

# Hibridação de veículo automóvel

*Bruno Filipe de Oliveira Magalhães*

***Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM***

Orientador na FEUP : Professor José Ferreira Duarte

Coorientador na FEUP: Professor Armando Luís Sousa Araújo

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



**FEUP** FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Ramo de Projeto, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel

fevereiro de 2014



## RESUMO

No presente, temas como a redução drástica das reservas e instabilidade do preço do petróleo, redução da emissão de gases de efeito de estufa e aquecimento global são problemas que necessitam de respostas imediatas e que levaram ao reforço da legislação sobre as emissões de gases poluentes e economia de combustível, através de tratados e acordos. De forma a respeitar estes novos acordos e tratados assinados quase na globalidade por todos os países, a Indústria Automóvel, os governos e alguns particulares, têm vindo a investir avultadas verbas na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias para fazer face ao maior desafio que a população mundial irá porventura enfrentar nos próximos 50 anos. Estas tecnologias têm como objetivo tornar viável a penetração no mercado de veículos de motorização elétrica, sejam eles híbridos elétricos, puramente elétricos ou elétricos a célula de combustível.

Os veículos elétricos, quando comparados com os veículos convencionais, permitem uma redução das emissões poluentes e economia de combustível. Os veículos híbridos elétricos (HEVs – *Hybrid Electric Vehicles*), alvo de estudo nesta dissertação, são mais eficientes ao nível do consumo de combustível, devido à utilização do motor de combustão interna (MCI) num regime ótimo de funcionamento, e também ao uso de tecnologia como a travagem regenerativa, que permite a recuperação da energia cinética durante a travagem.

O desenvolvimento de novas tecnologias e soluções para a implementação destes veículos, levou ao aparecimento do veículo híbrido elétrico “*plug-in*” (PHEV) que é uma evolução do HEV. Esta evolução é considerada como uma das mais promissoras para, a curto prazo, tornar os meios de transporte menos poluentes e mais económicos.

Quando comparados com o seu antecessor (HEV), os PHEVs permitem o carregamento do seu sistema de armazenamento de energia através da rede elétrica convencional, cuja energia pode ter origem numa fonte renovável, como por exemplo, energia eólica, hidroelétrica, solar ou geotérmica.

Os veículos híbridos elétricos permitem a utilização em simultâneo de várias tecnologias, sendo que a componente eletrónica tem especial importância. De uma forma geral, existe um aumento do número de componentes elétricos e eletrónicos, entre motores elétricos, baterias, supercondensadores, sensores, microcontroladores, etc. Para além destes, existe ainda a presença dos elementos mecânicos e hidráulicos, e do motor de combustão interna.

Assim, o objetivo desta dissertação é estudar a viabilidade de transformação de um veículo convencional num veículo híbrido elétrico “*plug-in*”, reduzindo os custos ao mínimo e evitando alterações estéticas no veículo adquirido. Foram estabelecidos requisitos que o veículo deverá respeitar e que serão apresentados com mais detalhe no respetivo capítulo.





## Hybridization of vehicle

### ABSTRACT

At present, issues such as drastic reduction of stocks and instability of oil prices, reduction of greenhouse gases and global warming are issues that need immediate answers and that led to the strengthening of legislation on exhaust emissions and economy fuel through treaties and agreements. In order to meet these new agreements and treaties signed almost in its entirety by all countries, the automobile industry, governments and some private, invested millions of euros in research and development of new technologies to meet the greatest challenge that the world population will perhaps face in the next 50 years. These technologies aims to make possible the penetration of electric vehicle powertrain market, be they hybrid electric, pure electric or fuel cell electric.

As we will see during the presentation of this dissertation, electric vehicles compared to conventional vehicles, allow for a reduction of emissions and fuel economy. The hybrid electric vehicles ( HEVs - Hybrid Electric Vehicles) , subject of study in this dissertation , are the most efficient fuel consumption level due to the use of the internal combustion engine ( MCI ) in a great operating system , and also the use of technology such as regenerative braking , allows recovery of kinetic energy during braking .

The development of new technologies and solutions for the deployment of these vehicles, led to the emergence of hybrid electric vehicle "plug-in" (PHEV) which is an evolution of HEV. This development is regarded as one of the most promising in the short run, making transportation cleaner and more economical. When compared to its predecessor (HEV), the PHEVs allow the loading of your storage system power through conventional power grid, whose energy may come from a renewable source such as wind, hydroelectric, solar or geothermal.

The electric hybrid vehicles allow the simultaneous use of various technologies, and the electronic component has special importance. In general, there is an increase in the number of electrical and electronic components, including electric motors, batteries, supercapacitors, sensors, microcontrollers, etc. Besides these, there is still the presence of mechanical and hydraulic components, and the internal combustion engine.

The objective of this dissertation is to study the feasibility of transforming a conventional vehicle into a hybrid electric vehicle "plug-in", reducing costs to a minimum and avoiding aesthetic changes on the vehicle purchased. Requirements that the vehicle must comply and which will be presented in more detail in the appropriate chapter were established.



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo o seu apoio, encorajamento e sacrifícios em prol da minha formação académica e enquanto homem.

Ao meu orientador, professor José Ferreira Duarte pela sua capacidade de orientação na fase final do curso, assim como por toda a disponibilidade, empenho pessoal e orientação durante a elaboração deste trabalho de dissertação.

Ao meu coorientador, professor Armando Luís Sousa Araújo pela disponibilidade, interesse e orientação dada no decurso deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela disponibilização das suas instalações e recursos necessários à elaboração deste trabalho.

A minha esposa, Susana, pela sua compreensão, apoio e encorajamento ao longo destes anos, fazendo-me acreditar que é possível concretizar o objetivo a que me propus.

Aos meus colegas de curso e amigos, Carlos Dias e Pedro Rodrigues, pela sua amizade e apoio demonstrados ao longo do curso, e pelo seu auxílio na realização deste trabalho.



# CONTEÚDO

<b>RESUMO .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>v</b>
<b>CONTEÚDO .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos do trabalho .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Conceito de HEV (Veículo híbrido elétrico) .....	7
2.2 História dos HEVs .....	7
2.3 Porquê HEV? .....	12
2.4 Conceito do Sistema de Propulsão de um HEV .....	14
2.5 Como categorizar os veículos híbridos elétricos (HEVs).....	17
2.5.1 Configurações disponíveis para um veículo HEV.....	17
2.5.2 Grau de Híbridização .....	26
<b>2.5.3 Classificação em função do método de reabastecimento .....</b>	<b>28</b>
2.6 Tecnologias tipicamente utilizadas nos veículos híbridos .....	29
2.6.1 Travagem regenerativa.....	29
2.6.2 "Start and Stop" automático .....	31
2.6.3 Assistência elétrica .....	31
2.7 Comparação entre HEVs: Micro, Médio, Completo e "Plug-in" vs. Tecnologia	32
2.8 Principais Componentes dos HEVs .....	33
2.8.1 Motor de Combustão Interna.....	33
2.8.2 Motores Elétricos .....	36
2.8.3 Sistema de Armazenamento de Energia .....	46
<b>3 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>61</b>

---

3.1	Seleção do veículo .....	61
3.2	O <i>Smart</i> e a sua história .....	63
3.3	Soluções Construtivas para a hibridização do <i>Smart</i> .....	64
3.3.1	Solução Construtiva Adotada .....	65
3.4	Elaboração dos projetos em 2D, desenhos de execução .....	100
3.5	Orçamentação e encomenda do material .....	100
3.6	Produção das peças nas oficinas.....	100
3.7	Outros componentes projetados.....	101
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
4.1	Conclusões .....	103
4.2	Trabalhos Futuros .....	105
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>111</b>
	Anexo A: Suporte do motor de tração.....	111
	A.1 Calculo dos esforços aplicados ao suporte .....	111
	A.2 Análise de tensões e deslocamentos para o suporte frontal .....	112
	A.3 Análise de tensões e deslocamentos para o suporte traseiro.....	115
	Anexo B: Desenhos de Fabricação .....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1   Veículo elétrico construído por Gustave Trouvé.[2] .....	1
Figura 1.2   Veículo La Jamais Contente, obteve recorde de velocidade.[4].....	2
Figura 1.3   Linha de produção em massa da Ford [5].....	3
Figura 1.4   Distribuição das emissões de dióxido de carbono entre 1980 e 1999 [3]....	4
Figura 1.5   Evolução das emissões de dióxido de carbono [3]. .....	4
Figura 2.1   Semper Vivus, o primeiro híbrido, construído por Ferdinand Porsche[11] .	8
Figura 2.2   Veículo Auto-Mixte com versão de dois e quatro motores.....	8
Figura 2.3   Veículo Woods Dual Power [12] .....	9
Figura 2.4   Toyota Prius 1ª Geração. [12] .....	10
Figura 2.5   Honda Insight 1ªGeração.[12] .....	10
Figura 2.6   Veículo Chevrolet Volt. [15] .....	11
Figura 2.7   Veículo Opel Ampera [12].....	11
Figura 2.8   Veículos superdesportivos híbridos [12] .....	11
Figura 2.9   UNEP, United Nations Environment Programme-2009- Hybrid Electric Vehicles.[17] .....	12
Figura 2.10   O caminho para a tecnologia híbrida (Cortesia da Toyota) [1] .....	12
Figura 2.11   Representação conceptual de um veículo híbrido elétrico. [3] .....	15
Figura 2.12   Representação da potência total em potência média (constante) e dinâmica. [3] .....	16
Figura 2.13   Veículos híbridos - Configuração bases dos HEVs. [1] .....	17
Figura 2.14   Configuração de um híbrido série (elétrico com extensão de autonomia). [3].....	18
Figura 2.15   Configuração de um híbrido paralelo. [3].....	20
Figura 2.16   Tipos de acoplamentos mecânicos mais utilizados. [3].....	21
Figura 2.17   Configuração de um híbrido série-paralelo. [3].....	22
Figura 2.18   Engrenagem Planetária.[25] .....	22
Figura 2.19   Engrenagem Planetária e respectivas equações de velocidade rotação e binário.[9] .....	23
Figura 2.20   Cálculo aproximado da máxima eficiência de transmissão teórica.[28] ..	25
Figura 2.21   Cálculo aproximado da máxima eficiência de transmissão teórica.[28] ..	25

---

Figura 2.22   Classificação em função da potência elétrica e das funcionalidades do motor elétrico.[29] .....	26
Figura 2.23   Micro híbrido Citroën C3 [30] .....	27
Figura 2.24   Híbrido médio Honda Insight, [31] .....	27
Figura 2.25   Híbrido completo Toyota Prius. [32].....	28
Figura 2.26   Esquema de um híbrido série (elétrico com extensor de autonomia) "plug-in". [34] .....	28
Figura 2.27   Chevrolet Volt híbrido "Plug-in". [15].....	29
Figura 2.28   Sistema travagem de um veículo híbrido e de um veículo convencional. [37] .....	30
Figura 2.29   Travagem Regenerativa. [38].....	30
Figura 2.30   Funcionamento da tecnologia "Start and Stop da Audi". [39] .....	31
Figura 2.31   Sistema biela-manivela, motor de combustão interna. [42] .....	33
Figura 2.32   Esquema Cilindro (PMS,PMI e curso). [43] .....	34
Figura 2.33   Os 4 tempos do motor de combustão interna a gasolina. [44] .....	35
Figura 2.34   Secções transversais dos motores. [46].....	37
Figura 2.35   Gráfico característico de um motor elétrico usado em HEVs. [46] .....	38
Figura 2.36   Motor DC aplicado na Citroën Berlingo Híbrido. [46] .....	39
Figura 2.37   Citroën Berlingo Hybrid. [47] .....	39
Figura 2.38   Motor elétrico de indução: Renault Kangoo. [48] .....	40
Figura 2.39   Gráfico característico do motor elétrico de indução. [46] .....	40
Figura 2.40   Motor elétrico de indução com mudança de polo. [36].....	41
Figura 2.41   Renault Kangoo Hybrid. [49].....	41
Figura 2.42   BMW X5 Hybrid. [50] .....	41
Figura 2.43   Motor elétrico de ímanes permanentes: Toyota Prius. [46] .....	42
Figura 2.44   Gráfico característico do motor de ímanes permanentes. [46] .....	42
Figura 2.45   Controlo do ângulo de condução. [46] .....	43
Figura 2.46   Toyota Prius Hybrid. [51] .....	43
Figura 2.47   Honda Insight Hybrid. [52].....	43
Figura 2.48   Conjunto motor combustão interna, motor elétrico de relutância variável e caixa de velocidades do Holden ECommodore. [53] .....	44
Figura 2.49   Gráfico característico do motor de relutância variável (SRM). [46].....	44
Figura 2.50   Holden ECommodore Hybrid. [53].....	45
Figura 2.51   Funcionamento de uma bateria. [55] .....	47



Figura 2.52   Voltagem "Cut-off" de uma bateria. [3] .....	47
Figura 2.53   Características de descarga de baterias de chumbo-ácido. [3] .....	48
Figura 2.54   Pack de baterias Ni-MH. [58] .....	53
Figura 2.55   Pack de baterias de íões de lítio. [59] .....	53
Figura 2.56   Comparação dos diferentes tipos de baterias. [7] .....	53
Figura 2.57   Célula individual de um supercondensador. [54] .....	54
Figura 2.58   Pack de supercondensadores para aplicação num veículo híbrido. [60] ..	54
Figura 2.59   Diagrama de blocos de um sistema de armazenamento de energia híbrido. [1] .....	55
Figura 2.60   Sistema híbrido de armazenamento de energia com baterias em paralelo com supercondensadores (conexão passiva). [9] .....	55
Figura 2.61   Modos de funcionamento de um veículo híbrido elétrico. [23] .....	57
Figura 2.62   Esquema de controlo de uma configuração paralelo - Honda Civic. [1] ..	57
Figura 2.63   Estratégia de controlo e gestão de potência de uma configuração série-paralelo, utilizado por exemplo no Toyota Prius. [1] .....	58
Figura 2.64   Modelos do estado estacionário do motor de combustão interna, do motor elétrico e da bateria. [1] .....	59
Figura 3.1   Fiat Seicento. [62] .....	61
Figura 3.2   Toyota iQ. [63] .....	61
Figura 3.3   Smart ForTwo. [64] .....	61
Figura 3.4   Aixam 400. [65] .....	61
Figura 3.5   Ligier Ixo Urban C. [66] .....	61
Figura 3.6   Smart ForTwo 1ª geração - veículo adquirido. ....	62
Figura 3.7   Nicholas Hayek, criador do veículo Smart. [68] .....	63
Figura 3.8   Smart ForFour. [69] .....	64
Figura 3.9   ForTwo 1ª geração. [64] .....	64
Figura 3.10   ForTwo 2ª geração. [64] .....	64
Figura 3.11   Folha de cálculo utilizada para determinação do binário de arranque do motor. ....	65
Figura 3.12   Motor Elétrico LMC LEM200. ....	65
Figura 3.13   Motor Elétrico EMRAX. [70] .....	66
Figura 3.14   Gráfico de potência do motor EMRAX 207 High Voltage. [70] .....	67
Figura 3.15   Gráfico do mapa de eficiência do motor EMRAX 207 High Voltage. [70] ..	67
Figura 3.16   Gráfico de potência do motor EMRAX 228 High Voltage. [70] .....	68
Figura 3.17   Gráfico do mapa de eficiência do motor EMRAX 228 High Voltage. [70] ..	68

---

Figura 3.18   Localização do motor e gerador elétrico no Smart. ....	69
Figura 3.19   Espaço disponível para colocação do motor e gerador elétrico. ....	69
Figura 3.20   Espaço disponível, em forma paralelepípedo, para alojamento do motor e gerador elétrico. ....	70
Figura 3.21   Compartimento da mala do Smart. ....	70
Figura 3.22   Caixa de velocidades original do Smart. ....	72
Figura 3.23   Eixo primário da caixa de velocidades do Smart. ....	73
Figura 3.24   Veio secundário da caixa de velocidades do Smart.....	73
Figura 3.25   Inversão do eixo primário. ....	74
Figura 3.26   Suporte frontal do motor de tração. ....	76
Figura 3.27   Suporte frontal do motor de tração. ....	76
Figura 3.28   Suporte traseiro do motor de tração.....	77
Figura 3.29   Suporte traseiro do motor de tração.....	77
Figura 3.30   Montagem da solução adotada para o motor de tração, suporte frontal. ....	77
Figura 3.31   Montagem da solução adotada para o motor de tração, suporte traseiro. ....	78
Figura 3.32   Montagem da solução adotada para o motor de tração, encaixe e guiamento.....	78
Figura 3.33   Montagem da solução adotada para o motor de tração, ligação entre suportes e encaixe.....	78
Figura 3.34   Montagem da solução adotada para o motor de tração, vista isométrica. ....	79
Figura 3.35   Gráfico de potência do motor EMRAX 228. [70] .....	80
Figura 3.36   Programa MaximizerPro 3.0. ....	80
Figura 3.37   Interface do programa MaximizerPro 3.0. ....	81
Figura 3.38   Seleção do programa MaximizerPro para as polias e correia. ....	82
Figura 3.39   Pormenor correia Falcon HTC. [72] .....	83
Figura 3.40   Dimensões da correia Falcon selecionada. [72] .....	83
Figura 3.41   Exemplo polia Falcon HTC. [72] .....	83
Figura 3.42   Sistema de transmissão de potência entre motor elétrico e veio primário da caixa de velocidades. ....	84
Figura 3.43   Sistema de transmissão de potência entre motor elétrico e veio primário da caixa de velocidades, com montagem do motor combustão interna.....	84
Figura 3.44   Sistema de transmissão de potência entre motor elétrico e veio primário da caixa de velocidades, vista isométrica.....	84

Figura 3.45   Suporte frontal do gerador elétrico.....	86
Figura 3.46   Suporte frontal do gerador elétrico.....	86
Figura 3.47   Suporte traseiro do gerador elétrico. ....	87
Figura 3.48   Suporte traseiro do gerador elétrico. ....	87
Figura 3.49   Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, suporte frontal. .....	87
Figura 3.50   Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, suporte traseiro. .....	88
Figura 3.51   Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, encaixe e guiamento.....	88
Figura 3.52   Montagem da solução adotada para o motor de tração, ligação entre suportes e encaixe. ....	88
Figura 3.53   Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, vista isométrica. .....	89
Figura 3.54   Seleção do programa MaximizerPro para as polias e correia. ....	90
Figura 3.55   Sistema de transmissão de potência entre gerador elétrico e veio do motor de combustão interna. ....	91
Figura 3.56   Sistema de transmissão de potência entre gerador elétrico e veio do motor de combustão interna, vista lateral.....	91
Figura 3.57   Sistema de transmissão de potência entre gerador elétrico e veio do motor de combustão interna, vista isométrica. ....	92
Figura 3.58   Montagem das soluções adotadas, vista topo. ....	92
Figura 3.59   Montagem das soluções adotadas, vista superior. ....	93
Figura 3.60   Montagem das soluções adotadas, perspectiva global. ....	93
Figura 3.61   Flange motor/gerador. ....	95
Figura 3.62   Flange motor/gerador. ....	95
Figura 3.63   Suporte do veio para polia de tensão.....	95
Figura 3.64   Suporte do veio para polia de tensão.....	95
Figura 3.65   Montagem no suporte do veio para polia tensão. ....	96
Figura 3.66   Veio para controlo do motor/gerador elétrico.....	96
Figura 3.67   Encaixe, vista frontal.....	97
Figura 3.68   Encaixe, vista lateral. ....	97
Figura 3.69   Encaixe, em perspectiva. ....	97
Figura 3.70   Vista frontal.....	98
Figura 3.71   Vista lateral. ....	98

---

Figura 3.72   Vista traseira. ....	98
Figura 3.73   Vista em perspectiva. ....	98
Figura 3.74   Dimensões do rolamento de esferas selecionado. [73] .....	99
Figura 3.75   Dimensões do rolamento de esferas selecionado. [73] .....	99
Figura 3.76   Produção do suporte traseiro em curso .....	101
Figura 3.77   Flange para motor/gerador .....	101
Figura 3.78   Fase inicial da produção do suporte frontal para motor/gerador .....	101
Figura 3.79   Caixa para controladores. ....	102
Figura 3.80   Suporte com sistema de fixação. ....	102
Figura 3.81   Montagem da caixa com respetivo suporte. ....	102
Figura 6.1   Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa) .....	112
Figura 6.2   Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa) .....	113
Figura 6.3   Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm) .....	113
Figura 6.4   Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm) .....	114
Figura 6.5   Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa) .....	115
Figura 6.6   Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa) .....	116
Figura 6.7   Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm) .....	116
Figura 6.8   Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm) .....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1   Características dos BEVs, HEVs e FCEVs. [1] .....	13
Tabela 2.2   Tabela comparativa entre veículos com diferentes tipos de propulsão. [19] .....	14
Tabela 2.3   Comparação entre as diferentes configurações com um veículo convencional.[26] .....	24
Tabela 2.4   Cortesia da Power System Design. [40] .....	32
Tabela 2.5   Motor de combustão interna utilizados em alguns veículos híbridos. [45] .....	36
Tabela 2.6   Avaliação dos sistemas de propulsão elétrica. [46] .....	45
Tabela 2.7   Características das baterias Chumbo-ácido. [56] .....	49
Tabela 2.8   Características das baterias Ni-MH. [56].....	49
Tabela 2.9   Características das baterias Ni-Cd. [56] .....	50
Tabela 2.10   Características das baterias de Iões de Lítio. [56].....	51
Tabela 2.11   Características das baterias de Lítio-Polímero. [56] .....	51
Tabela 2.12   Comparação entre os diferentes tipos de baterias para EVs e HEVs. ....	52
Tabela 3.1   Características do veículo adquirido. [45] .....	62
Tabela 3.2   Características dos equipamentos usados como motor/gerador elétrico. [70].....	66
Tabela 3.3   Especificações técnicas do alumínio AW7075. [71].....	71
Tabela 3.4   Especificações técnicas do alumínio AW7075. [71].....	71
Tabela 3.5   Especificações técnicas do alumínio AW7075. [71].....	71
Tabela 3.6   Relações finais Smart ForTwo adquirido. ....	74
Tabela 3.7   Dados de entrada no software MaximizerPro 3.0. ....	81
Tabela 3.8   Polias e correia selecionadas. ....	82
Tabela 3.9   Dados de entrada no software MaximizerPro 3.0. ....	89
Tabela 3.10   Polias e correia selecionadas. ....	90
Tabela 3.11   Especificações técnicas do aço CK 45. ....	94
Tabela 3.12   Especificações técnicas do aço CK 45. ....	94
Tabela 3.13   Especificações técnicas do aço CK 45. ....	94
Tabela 6.1   Valores máximos de tensão e deslocamento atingidos.....	114
Tabela 6.2   Valores máximos de tensão e deslocamento atingidos.....	117

---

## SIGLAS E ABREVIATURAS

BEV	Veículo elétrico a bateria;
DEEC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores;
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica;
E-REV	Veículo elétrico com extensor de autonomia;
FCEV	Veículo elétrico a célula de combustível;
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
HEV	Veículo híbrido elétrico;
HF	Fator de Hibridização;
IM	Motor de indução;
IMA	<i>Integrated Motor Assist</i> ;
MCI	Motor de Combustão Interna;
MIEM	Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica;
Motor DC	Motor de corrente contínua;
OFSTM	Oficina de Serralharia de Tecnologia Mecânica
OPEP	Organização Países Exportadores de Petróleo;
PHEV	Veículo híbrido elétrico <i>plug-in</i> ;
PMI	Ponto morto inferior;
PMS	Ponto morto superior;
SAE	Society of Automotive Engineers;
SoC	Estado da carga;
ZEV	Veículo com zero emissões;
<i>A 50 [%]</i>	Alongamento;
<i>Ah</i>	Ampere-hora, é uma unidade de carga elétrica; (1Ah = 3600 C)
Al	Liga de Alumínio;
<i>Brinell [HB]</i>	Medição de dureza utilizada principalmente nos materiais metálicos;
<i>C (A.s)</i>	Coulomb, unidade de carga elétrica no sistema internacional
<i>cc</i>	Cilindrada ou volume varrido do motor
<i>E (GPa)</i>	Módulo de Young ou módulo de elasticidade;
<i>g/km</i>	Gramas por quilómetro;
<i>h</i>	Hora, unidade de tempo no sistema internacional;
<i>i</i>	Relação de transmissão;
<i>kg</i>	Quilograma, unidade básica de massa no sistema internacional;

<i>km</i>	Quilómetro, unidade de comprimento no sistema internacional;
<i>kW</i>	Quilowatt, unidade de potência no sistema internacional;
<i>l</i>	Litro, unidade básica de volume no sistema internacional;
<i>m</i>	Metro, unidade de comprimento no sistema internacional;
<i>mm</i>	Milímetro, unidade de comprimento no sistema internacional;
<i>MPa</i>	Mega Pascal, a unidade padrão de pressão e tensão no sistema internacional;
<i>Rp0,2(MPa)</i>	Tensão limite de escoamento;
<i>Rm [MPa]</i>	Tensão limite de cedência à tração;
<i>s</i>	Segundo, unidade de tempo no sistema internacional;
<i>T (N.m)</i>	Binário;
<i>v (Km/h)</i>	Velocidade em quilómetros por hora;
<i>V</i>	Volt, unidade de tensão elétrica no sistema internacional;
<i>ω (rad/s)</i>	Velocidade angular;
€	Moeda oficial da União Europeia;
°	Grau;
<i>σ (MPa)</i>	Tensão limite elástico;





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Apesar de os veículos puramente elétricos (BEVs), híbridos (HEVs) e célula de combustível (FCEVs) estarem a ser objeto de investigação e desenvolvimento, estes não são recentes, ao contrário daquilo que se possa pensar. *Sir William Grove*, em 1839, apresentou uma célula de combustível básica ao mundo, contudo não teve o sucesso desejado, devido ao facto de a eletricidade ainda não estar desenvolvida e existir um desconhecimento do seu funcionamento. [1]



Figura 1.1 | Veículo elétrico construído por Gustave Trouvé.[2]

Por sua vez, o primeiro veículo elétrico foi construído em 1881 pelo francês *Gustave Trouvé*, e era um triciclo com um motor DC com 0,07 KW alimentado por baterias de chumbo-ácido. Outros veículos elétricos foram produzidos, contudo acabaram por não ter grande expressão, pois na altura a tecnologia não estava suficientemente desenvolvida, não conseguindo mesmo competir com as carroças de cavalo. A sua velocidade máxima era de 15 km/h com uma autonomia de 29 km o que os tornava pouco atrativos face a potenciais consumidores. [3]

No entanto estávamos no início de uma nova era, e assim foi nos 20 anos seguintes, em que a tecnologia elétrica conheceu grandes desenvolvimentos, que levaram ao aparecimento de novos veículos, novas tecnologias, e durante algum tempo os veículos elétricos detiveram o recorde de velocidade, obtido pelo francês *Camille Jenatton* em 1899 quando o seu veículo "*La Jamais Contente*" atingiu os 105,8 km/h. [3]

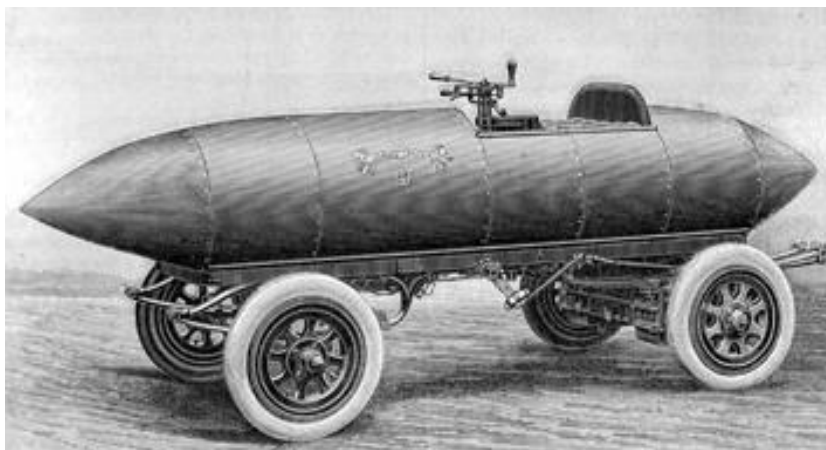


Figura 1.2 | Veículo La Jamais Contente, obteve recorde de velocidade.[4]

Por sua vez, *Ferdinand Porsche* criou o primeiro híbrido elétrico em 1900, com o nome *Lohner-Porsche Semper Vivus*. No entanto, quer esta versão quer a evolução mais comercial que foi lançada no ano seguinte não tiveram sucesso, devido ao seu elevado custo e complexidade, situação que se verificou até aos anos 70. [3]

Os veículos elétricos tiveram especial relevo nesta fase inicial do século XX, sendo os mais procurados. Nesta altura já existiam veículos elétricos, a vapor e a gasolina, mas o elétrico era de longe o mais fiável, ecológico, silencioso, e sendo que as viagens eram maioritariamente dentro das localidades (curtas) a baixa autonomia não tinha grande influência. [3]

Já no início de século XX a indústria automóvel sofreu uma enorme evolução, em especial devido á crescente evolução dos motores de combustão interna, que se tornaram mais potentes, flexíveis, fáceis de manusear, com maior fiabilidade e uma maior autonomia quando comparados com os elétricos. Aliado a tudo isto, ocorreu também uma melhoria das infraestruturas rodoviárias em todo o mundo, o que "aproximou" as cidades e tornaram possíveis as viagens mais longas, logo favorecendo os motores de combustão interna. O alto custo dos veículos elétricos foi também um entrave á sua evolução nesta fase, isto apesar de ter sempre estado á frente tecnologicamente sob o ponto de vista da eficiência. O tempo de carregamento e o preço das baterias foram também outros fatores que prejudicaram o desenvolvimento dos veículos elétricos. Em 1932, a tecnologia de células de combustível conheceu o primeiro sucesso, com *Francis Bacon*, que apresentou uma célula de combustível alcalina. Esta tecnologia apesar de utilizada pela NASA em viagens espaciais, nunca conseguiu ter expressão no mundo automóvel, devido ao pouco desenvolvimento tecnológico. [3]

Todos estes fatores conjugados levaram, nos sessenta anos seguintes, ao quase desaparecimento dos veículos elétricos e híbridos. Os veículos elétricos ainda ocuparam lugares de menor expressão, sendo utilizados em carrinhos de golfe ou de transporte de pequenas dimensões. [3]



*Figura 1.3 | Linha de produção em massa da Ford [5]*

Tinha começado uma nova era no mundo automóvel, com a evolução dos motores de combustão interna, com a descoberta de novas reservas de petróleo que permitiu uma redução no preço da gasolina. Daí á produção em massa de veículos com motor de combustão interna, iniciada por Henry Ford, foi um pequeno passo. O Modelo T da Ford, vendido entre os 500 e os 1000 dólares, veio acentuar ainda mais a diferença de custo para os veículos elétricos, cujo preço continuava a aumentar. [6]

O reaparecimento dos veículos elétricos e híbridos surge entre 1960 e 1970 quando devido à crise de petróleo, originada pela criação da OPEP (Organização Países Exportadores de Petróleo) se iniciaram os embargos aos Estados Unidos e à Europa. A constante instabilidade no preço do petróleo, levou à procura de uma alternativa ao uso da gasolina. [1] Mas nem só esta instabilidade fomentou esta nova necessidade de encontrar alternativas ao petróleo, dado ser um bem não renovável as suas reservas podem-se esgotar a curto-médio prazo, bem como os elevados índices de poluição que tem alarmado todo o mundo e que os países vêm-se agora obrigados a controlar após a assinatura de vários tratados. [3]

A poluição do ar e o aquecimento global são atualmente temas em discussão quase diariamente, e não é por acaso que nas últimas décadas há um grande investimento em pesquisas de tecnologias mais ecológicas mas ao mesmo tempo eficientes que permitam combater este grande flagelo. [3]

A Figura 1.4 apresenta a distribuição em % das emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) entre 1980 e 1999,

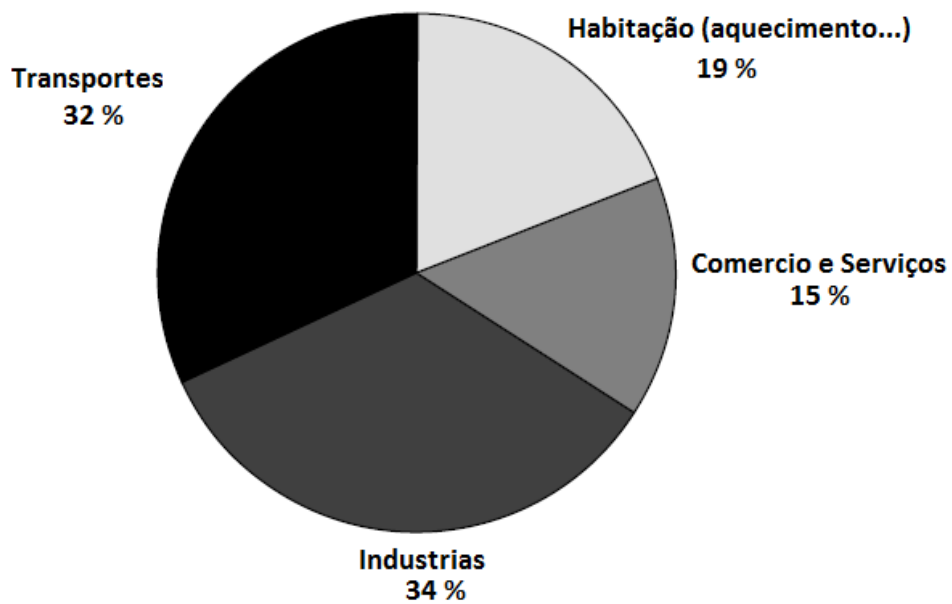


Figura 1.4 | Distribuição das emissões de dióxido de carbono entre 1980 e 1999 [3]

A Figura 1.5 apresenta a evolução destas emissões ao longo de 25 anos (1975 e 2000),

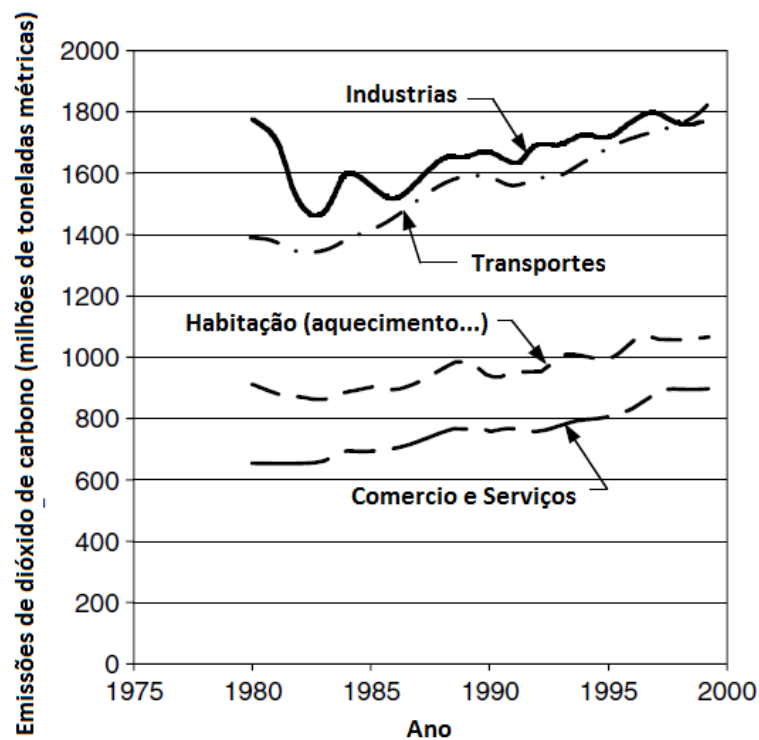


Figura 1.5 | Evolução das emissões de dióxido de carbono [3].

O aquecimento global é resultado do designado "efeito de estufa", provocado pela presença de dióxido de carbono e outros gases, como metano, óxido nitroso, entre outros, que se designam como gases de efeito de estufa. Estes gases absorvem alguma dessa energia de volta para a superfície, resultando num aumento de energia absorvida

pela superfície e como tal no aquecimento da mesma. Assim o excesso destes gases de efeito de estufa, provocam uma subida de temperatura da superfície terrestre originando grandes danos ecológicos nos ecossistemas, podendo estar na origem de vários desastres naturais que com mais frequência assolam o nosso planeta. [3]

Assim, nas últimas décadas têm sido feitas muitas investigações e desenvolvido uma série de atividades na área dos transportes de modo a ser possível o fabrico de veículos com elevada eficiência, ecológicos e seguros. E assim surgiram as propostas para que os veículos convencionais fossem substituídos por veículos puramente elétricos (EVs), veículos híbridos elétricos (HEVs) e veículos a célula de combustível (FCVs) num futuro próximo. [3]

Comparativamente aos veículos convencionais, os veículos elétricos (BEVs) são energeticamente mais eficientes e produzem, na sua utilização, zero emissões para a atmosfera. Contudo estes veículos não tiveram grande sucesso até ao momento devido ao seu elevado custo, aliado ao peso das baterias, limitação da distância que podem percorrer e ainda a falta de infraestruturas a nível mundial para o recarregamento das suas baterias. Os veículos híbridos elétricos (HEVs) foram desenvolvidos de forma a preencher as lacunas deixadas quer pelos veículos com motores de combustão interna quer pelos veículos puramente elétricos, e oferecem uma melhoria na economia de combustível, baixas emissões de  $CO_2$ , e ao invés dos BEVs os HEVs tiram partido da rede de abastecimento de combustível já existente, contudo dependem ainda inteiramente do petróleo para o carregamento das baterias. Por último as células de combustível (FCs) evoluíram bastante no último século, estando a ser usadas na indústria dos transportes, militar, telecomunicações, entre outros. No entanto o seu elevado custo e os desafios tecnológicos que ainda terá de enfrentar deverão limitar a sua entrada no mercado nos próximos 10 ou 15 anos. [7]

## 1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho consiste na conversão de um veículo *Smart ForTwo* convencional com motorização a gasolina de 599 cc, num veículo híbrido elétrico série *plug-in*.

Este trabalho é resultado de uma parceria entre o DEMec (Departamento de Engenharia Mecânica) e o DEEC (Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Este projeto teve o seu início em Março de 2013.

O trabalho desta dissertação, iniciou-se com o estudo e análise detalhada do trabalho desenvolvido no projeto até Setembro de 2013, foi analisada a seleção do motor e gerador elétrico, bem como todos os cálculos necessários para esse dimensionamento (parte desenvolvida por estudantes do DEEC) e análise da solução mecânica para o acoplamento dos mais diversos componentes (parte desenvolvida por estudantes do DEMec).

Na fase inicial do projeto foram definidos os objetivos de funcionamento, assim como alguns pré-requisitos que é importante apresentar:

- Funcionamento em modo puramente elétrico com autonomia mínima de 40 km, este percurso poderá incluir circuito urbano e extraurbano;
- O veículo deverá possuir a capacidade de ver o seu sistema de armazenamento de energia ser completamente carregado pela rede elétrica convencional, sendo por isso definido como veículo *plug-in*;
- A velocidade máxima deverá ser de 120 km/h, quer esteja a funcionar em modo híbrido ou puramente elétrico;
- Sempre que o nível de carga do sistema de armazenamento de energia for baixo, o motor de combustão interna será utilizado para o recarregar sempre que necessário.
- O motor de combustão interna poderá, através de um gerador de corrente elétrica, acionar diretamente o motor elétrico;
- Como forma de reduzir os custos envolvidos na conversão do veículo convencional para um híbrido elétrico série *plug-in*, o aspeto visual e a identidade do veículo deverão sofrer o mínimo de alterações possíveis.

Após o correto dimensionamento do motor e gerador, bem como da solução mecânica idealizada para o acoplamento dos mais diversos componentes, seguiu-se a elaboração dos desenhos de fabricação dos componentes que servirão de suporte para a realização do trabalho, tendo em conta o processo de fabrico e as características do material utilizado. Procedeu-se então à encomenda do material necessário que em conjunto com os respetivos desenhos de fabricação permitiram avançar para o início do processo de fabrico. A fase final do trabalho consiste na montagem de todos os componentes projetados e necessários à conversão do veículo *Smart* convencional, num veículo híbrido elétrico série *plug-in*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Conceito de HEV (Veículo híbrido elétrico)

Em termos gerais um veículo que possua duas ou mais fontes de energia, designa-se por veículo híbrido. Um veículo híbrido pode ter mais que uma fonte de energia, como um motor de combustão interna utilizando derivados de petróleo, gás natural, etanol, entre outros (fonte energia térmica), célula de combustível-hidrogénio (fonte energia elétrica), baterias químicas (fonte energia elétrica), entre outros. Um veículo híbrido com um sistema de propulsão elétrico é designado de HEV.[3]

Com esta combinação é possível aproveitar os benefícios de ambos os tipos de propulsão, o motor elétrico permite uma aceleração mais rápida enquanto que o motor de combustão interna (MCI) obterá melhor performance devido a operar no regime ótimo de funcionamento (velocidades constantes). [8] Devido ao facto de o MCI estar a operar no regime ótimo de funcionamento, aliado à possibilidade de usar a travagem regenerativa permitirá obter maior economia de combustível e baixar as emissões de CO<sub>2</sub> produzidas pelo MCI. [9]

Resumidamente o que é pedido a um sistema de propulsão de um veículo é que:

- Desenvolva uma potência que satisfaça as necessidades de performance do veículo;
- Possua uma capacidade de armazenar energia que permita ao veículo percorrer uma determinada distância;
- Demonstre uma alta eficiência;
- E seja Ecológico.

### 2.2 História dos HEVs

A história do HEV teve o seu início há mais de 100 anos. Para quem pensa que os veículos híbridos são um fenómeno recente, esta tecnologia já existe desde a criação dos primeiros automóveis. No entanto, apenas recentemente é que as empresas fabricantes de veículos se empenharam seriamente nesta tecnologia devido ao aumento dos preços dos combustíveis, ao possível desaparecimento do petróleo a curto-médio prazo e devido também aos elevados índices de poluição atuais. [10]

Assim o primeiro veículo híbrido foi construído no ano de 1900 pelo Engenheiro *Ferdinand Porsche*, com o nome de *Lohner-Porsche Semper Vivus*, sendo apresentado ao mundo no *Paris Motor Show*. O primeiro HEV possuía dois motores de combustão interna a gasolina, que moviam dois geradores elétricos 2,5 CV que por sua vez alimentariam com 20 amperes a 90 volts, os motores elétricos acoplados nas rodas dianteiras e as baterias. Os geradores podiam funcionar em sentido inverso de forma a iniciar o motor de combustão interna.[11]

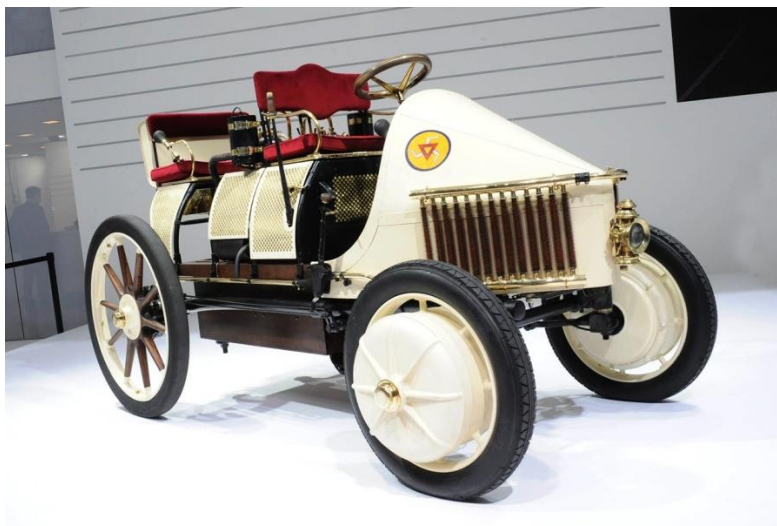


Figura 2.1 | *Semper Vivus*, o primeiro híbrido, construído por Ferdinand Porsche[11]

Apesar de inovador, o *Semper Vivus* não conseguiu atrair os potenciais compradores do veículo. Ferdinand Porsche inspirou-se neste veículo e imediatamente começou a trabalhar num novo conceito, e assim em 1901 nasceu o *Lohner-Porsche Mixte Hybrid*.

O *Mixte* possuía apenas um motor de combustão de 5,5 litros e 25 CV e teve duas versões, com dois e quatro motores acoplados nos cubos das rodas. Apesar do sucesso nas várias provas em que participou, o seu elevado preço e a sua complexidade travaram o seu sucesso e apenas foram produzidas 11 unidades. Tanto o *Semper Vivus* quanto o *Mixte Hybrid* eram híbridos série, os primeiros híbridos paralelos surgiram alguns anos depois. [11]

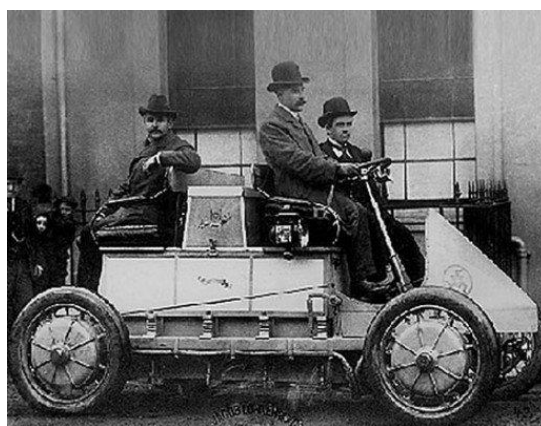
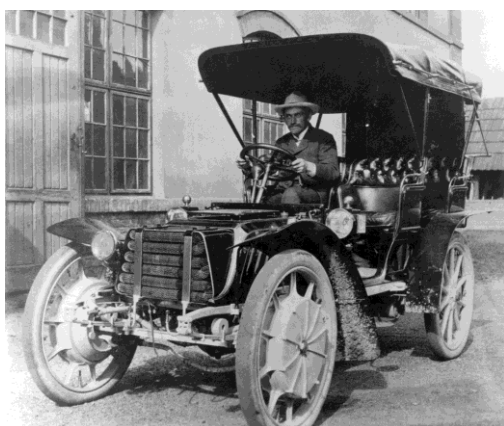


Figura 2.2 | Veículo Auto-Mixte com versão de dois e quatro motores.

Em 1906 surgiu então um dos primeiros híbridos paralelos, o *Auto-Mixte* produzido em Liège na Bélgica, segundo a patente de *Henri Pieper*. Este veículo apresentava um motor elétrico e um motor de combustão mecanicamente interligados. O motor elétrico, alimentado pelas baterias, era utilizado para arrancar o motor de combustão ou como fonte adicional de binário. Quando a potência gerada pelo motor de combustão fosse superior à requerida para mover o veículo, o motor elétrico iria funcionar como gerador carregando as baterias. [12]



Apesar dos veículos desenvolvidos por *Porsche* e *Pieper* no início do século XX, as vantagens dos híbridos não compensavam os elevados custos e complexidade dos veículos. [3]

Neste princípio de século, os veículos usando motores de combustão interna (MCI) sofreram uma grande evolução tecnológica, e aliados à melhoria das infraestruturas rodoviárias e ao aparecimento da produção em massa, levaram que nas décadas seguintes a tecnologia híbrida fosse deixada para segundo plano. *Henri Ford*, em 1908, deu início à produção em massa de veículos usando motores de combustão interna a gasolina, designadamente o Modelo T da Ford. Esses carros eram muito menos complexos, mais leves e possuíam preços muito acessíveis. Com a era da produção em massa, veio o declínio dos veículos elétricos e híbridos nas décadas seguintes. [6]

Em 1917 surge o *Woods Dual Power*, numa última tentativa de fazer vingar a tecnologia híbrida no início do século XX. Era um veículo híbrido paralelo que acoplava um motor de combustão a um motor elétrico através de uma embraiagem magnética. Este veículo podia ainda funcionar em três modos diferentes: puramente elétrico, puramente a gasolina ou através da combinação dos dois tipos de motorização. Este veículo possuía também a capacidade de carregar as baterias em andamento através do seu motor de combustão ou por meio de travagem regenerativa em percurso plano ou com declive descendente. [12]



Figura 2.3 | Veículo Woods Dual Power [12]

Com a evolução dos motores de combustão interna e a produção em massa de *Ford*, os veículos híbridos estiveram em suspenso até 1970, altura em que despoletou a "crise" do petróleo. A *OPEP* (Organização Países Exportadores de Petróleo) impôs um embargo contra os Estados Unidos e Europa devido ao facto de estes se intrometerem na guerra Árabe com Israel. Este embargo consistia não só na total proibição de exportação de petróleo para estes países, bem como um corte na produção de petróleo. Assim e com as principais economias mundiais dependentes do petróleo, nomeadamente para transportes e energia, não restava outra alternativa que não fosse o desenvolvimento ou descoberta de tecnologias que permitisse a independência do petróleo. [13]

O governo dos Estados Unidos tomou a iniciativa e financiou de imediato um programa que fomentava o desenvolvimento destas tecnologias. [10]

O feito histórico ficou registado em 1997, ano em que a *Toyota* lançou no mercado o primeiro veículo híbrido a ser fabricado em série (fabricado inicialmente no Japão), o *Toyota Prius*. Este veículo utiliza um sistema de engrenagens planetárias como dispositivo divisor de potência. Possui dois motores elétricos de ímãs permanentes, um utilizado como motor e outro como gerador. O motor de combustão interna fica desligado quando o veículo circula a baixas velocidades. Esta tecnologia continua a ser utilizada nos veículos mais recentes da *Toyota*.



Figura 2.4 | *Toyota Prius 1ª Geração.* [12]

Logo em seguida, em 1999, apareceu o *Honda Insight*, primeiro carro híbrido elétrico-gasolina a entrar no mercado norte-americano.



Figura 2.5 | *Honda Insight 1ª Geração.* [12]

O *Honda Insight* utiliza uma tecnologia diferente da *Toyota*, o designado Motor Integrado Auxiliar (IMA - *Integrated Motor Assist*). Tal como o *Prius*, o *Insight* usa baterias *NiMH* para o seu sistema de armazenamento de energia. Estas podem ser carregadas pelo motor de combustão interna que move um gerador ou ainda através da travagem regenerativa. O motor elétrico auxilia o motor térmico fornecendo potência extra durante as acelerações e permitindo que o motor a combustão interna funcione na sua rotação ideal. A *Honda* aproveitou esta mesma tecnologia em outros veículos, como é o caso do *Civic Hybrid* e do *CR-Z*. [11]

De uma forma geral, as principais marcas de veículos automóveis lançaram posteriormente os seus híbridos no mercado. *Ford*, *Mercedes-Benz*, *BMW*, *Audi*, *Volkswagen*, *Porsche*, *Peugeot*, *Citroën* e *GM* são alguns dos exemplos dessas marcas.

Nos finais de 2009 regista-se novo avanço tecnológico nos veículos híbridos quando a *Toyota* lançou o primeiro híbrido *plug-in* (PHEV), o *Prius Plug-In*. A diferença entre este

veículo e o *Prius* comum é o facto das suas baterias poderem ser recarregadas pela rede elétrica comum. [12]

Em 2010, a *Chevrolet* lançou nos Estados Unidos o *Volt*, um híbrido também ele *plug-in*, que veio definir uma nova classe de veículos híbridos: os veículos elétricos com extensor de autonomia (*E-REV -Extended Range Electric Vehicle*). Nestes veículos a principal função do motor de combustão interna é fornecer energia para recarregar as baterias ou fornecer energia diretamente ao motor elétrico quando o estado de carregamento das baterias estiver a um nível muito baixo. [14]



Figura 2.6 | Veículo Chevrolet Volt. [15]

Um ano mais tarde, em 2011, foi lançado o *Opel Ampera* que é a versão europeia do *Chevrolet Volt*. [9]



Figura 2.7 | Veículo Opel Ampera [12]

Nos últimos anos tem sido implementado em vários desportivos e superdesportivos a tecnologia híbrida. São o caso do *Honda CR-Z Híbrido*, *Tesla Roadster*, *Porsche Panamera S*, o *Ferrari La Ferrari* entre outros. [16]



Figura 2.8 | Veículos superdesportivos híbridos [12]

Assim, penetração no mercado automóvel dos híbridos elétricos tem sido progressiva, mas sempre num sentido crescente como comprova o gráfico que resultou de um

estudo das Nações Unidas. Este estudo foi feito em 2009, sendo que as barras entre 2009 e 2013 são projeções. [17]

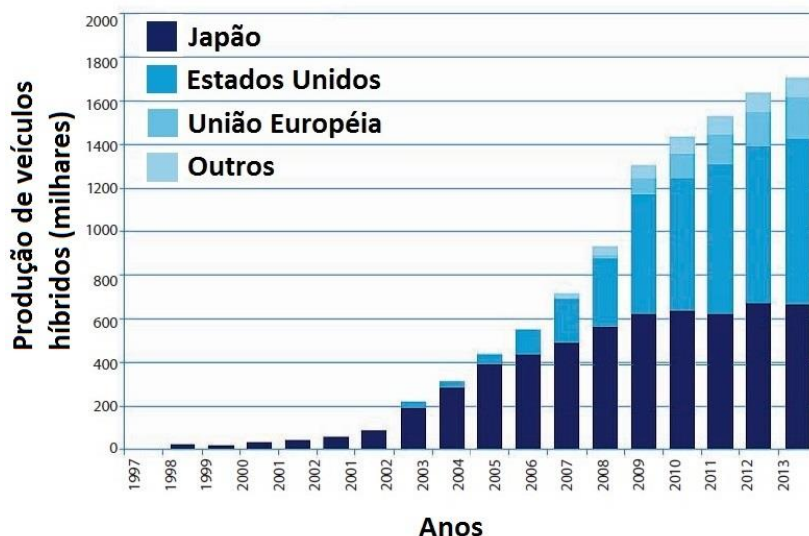


Figura 2.9 | UNEP, United Nations Environment Programme-2009- Hybrid Electric Vehicles.[17]

## 2.3 Porquê HEV?

Os veículos elétricos a baterias, ou puramente elétricos (BEVs) e os veículos elétricos a célula de combustível (FCEVs) são os principais concorrentes dos veículos híbridos elétricos (HEVs) na substituição dos veículos convencionais, que visa a diminuição das emissões, maior eficiência energética, redução ou eliminação da dependência do petróleo.[1]

### Questões:

- Redução emissões CO<sub>2</sub>
- Procura diversificação energética
- Diminuição poluição na atmosfera

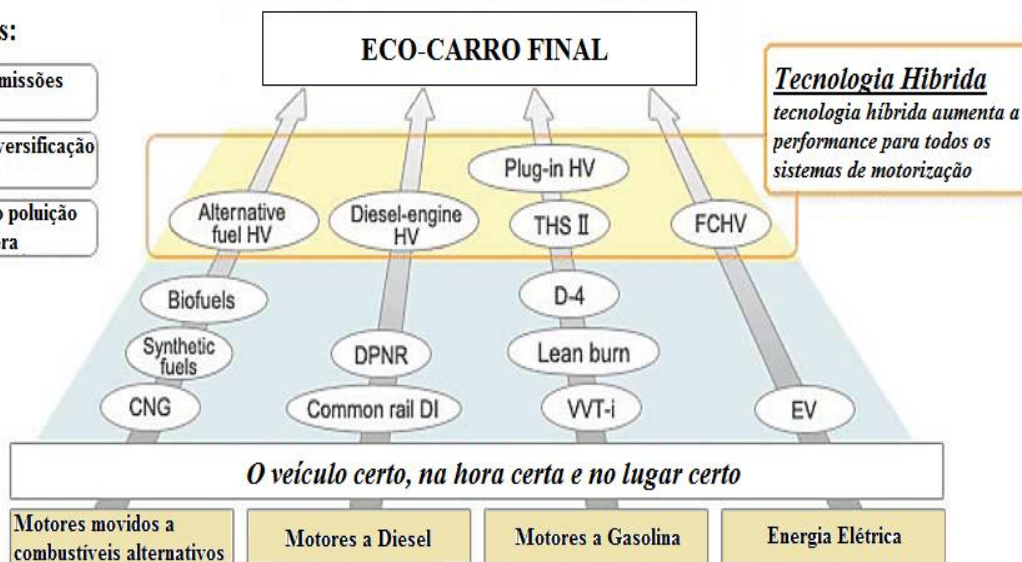


Figura 2.10 | O caminho para a tecnologia híbrida (Cortesia da Toyota) [1]



Na Tabela 2.1 é possível comparar as principais características dos BEV, HEV e FCEV:

**Tabela 2.1** | Características dos BEVs, HEVs e FCEVs. [1]

<b>Tipos Veículos Elétricos</b>	<b>Elétrico Bateria (BEV)</b>	<b>Híbrido Elétrico (HEV)</b>	<b>Elétrico a Célula Combustível (FCEV)</b>
<b>Propulsão</b>	- Elétrica	- Elétrica - Motor Combustão Interna	- Elétrica
<b>Sistema Energia</b>	- Baterias - Ultracapacitores	- Baterias - Ultracapacitores - Motor Combustão Interna	- Célula de Combustível - Baterias ou Ultracapacitores (aumentar a densidade potência necessária no arranque)
<b>Fontes de energia e Infraestruturas</b>	- Rede elétrica - Unidades de Carregamento	- Postos Gasolina - Rede elétrica - Unidades de carregamento (para veículos <i>Plug-In</i> )	- Hidrogénio - Produção hidrogénio e infraestrutura de transporte
<b>Características</b>	- Zero emissões - Elevada eficiência energética - Independência do petróleo - Curtas distâncias - Custo inicial elevado - Tecnologia Comercial	- Emissões muito baixas - Poupança de combustível elevada comparando com veículo convencional - Longas distâncias - Dependência petróleo (veículos sem <i>Plug-in</i> ) - Custo mais elevado quando comparado com veículo convencional - Tecnologia Comercial	- Zero emissões - Elevada eficiência energética - Independência do petróleo (se não for usada gasolina na produção do hidrogénio) - Longas distâncias - Elevado custo - Tecnologia em desenvolvimento
<b>Questões importantes</b>	- Baterias - Gestão de baterias - Unidades de carregamento - Custo	- Controlo, otimização e gestão de diversas fontes de energia - Dimensionamento e gestão das baterias	- Custo das células combustível, ciclo vida e a segurança - Infraestrutura para o Hidrogénio

Analisando a tabela, nas questões das emissões, tecnologia e independência do petróleo a escolha mais sensata seria o veículo elétrico a bateria (BEV), contudo a sua baixa autonomia restringe a sua utilização em percursos mais longos. Do lado oposto aparecem o veículo elétrico híbrido (HEV) e o veículo elétrico a célula de combustível (FCEV) que não possuem essa limitação. Analisando agora o FCEV, é possível verificar que, tal como BEV, é livre de emissões na sua utilização, contudo o facto de ser uma tecnologia ainda em desenvolvimento, questões de segurança, transporte e implementação de infraestruturas capazes de armazenar o hidrogénio são um problema que limita a sua aplicação no curto/médio prazo. [1] Assim sendo, enquanto não houver um desenvolvimento na tecnologia de armazenamento de energia e no seu custo associado que permita ao veículo elétrico a bateria (BEV) ser mais competitivo, o veículo

elétrico híbrido (HEV) continuará a ser a melhor alternativa aos veículos convencionais. [18]

Por último, o investimento inicial é um fator muito importante a ser analisado, sendo que aqui o HEV toma clara vantagem pois das três tecnologias apontadas como alternativa ao veículo convencional é a que apresenta um custo mais baixo, apesar de nestes últimos anos ter sido feito um grande desenvolvimento na redução de custos das outras duas tecnologias, contudo ainda não conseguiram ser competitivas como o HEV. A Tabela 2.2 faz a comparação entre quatro veículos com características e especificações muito idênticas, com o pormenor de usarem quatro tecnologias distintas: MCI, HEV, BEV e FCEV. [19]

*Tabela 2.2 | Tabela comparativa entre veículos com diferentes tipos de propulsão. [19]*

	<b>MCI (VW Golf 1.4 TSI)</b>	<b>HEV (Toyota Prius III)</b>	<b>BEV (Nissan Leaf)</b>	<b>FCEV (Honda FCX Clarity)</b>
<b>Fonte de Energia</b>	MCI	MCI Motor Elétrico	Bateria e Motor Elétrico	PEM Células Combustível e Motor Elétrico
<b>Combustível</b>	Gasolina, Gasóleo e Alternativos	Gasolina/Gasóleo como principais	Eletricidade	Hidrogénio
<b>Vel. Máx (km/h)</b>	199	180	151	160
<b>Aceleração (s)</b>	9,5	10,4	7	10
<b>Distância (km)</b>	888,4	1152,3	117,5-175,4	386,2
<b>Custo Aquisição</b>	21.508€	24.434€	30.177€	58.524€
<b>Custo combustível por km percorrido</b>	0,16€	0,10€	Desde 0,01€	Desde 0,05€
<b>Consumo Combustível (l aos 100km)</b>	5,2	3,3	2,4	2,9
<b>Emissões CO2 (g/km)</b>	144	89	0	0

A análise da Tabela 2.2, permite constatar algumas características importantes que distinguem claramente os quatro veículos com diferentes tipos de propulsão. Verifica-se que a autonomia e o custo de aquisição dos BEV e FCEV podem ser um entrave à sua afirmação no mercado automóvel quando comparados com os veículos convencionais e com os HEVs. No entanto, apresentam também algumas vantagens, tal como a economia de combustível, a redução das emissões poluentes (zero emissões na sua utilização) e o custo por quilómetro percorrido.

## 2.4 Conceito do Sistema de Propulsão de um HEV

Por definição, o veículo híbrido é um veículo que possui duas ou mais fontes de energia, e caso possua uma propulsão elétrica é designado de veículo híbrido elétrico (HEV). Por outras palavras representa um cruzamento de um veículo convencional com um veículo

elétrico. Combinam um sistema de transmissão elétrico, incluindo baterias ou outro método de armazenamento de energia, com uma fonte de energia rapidamente reabastecível como motores a gasolina ou a gasóleo. [20]

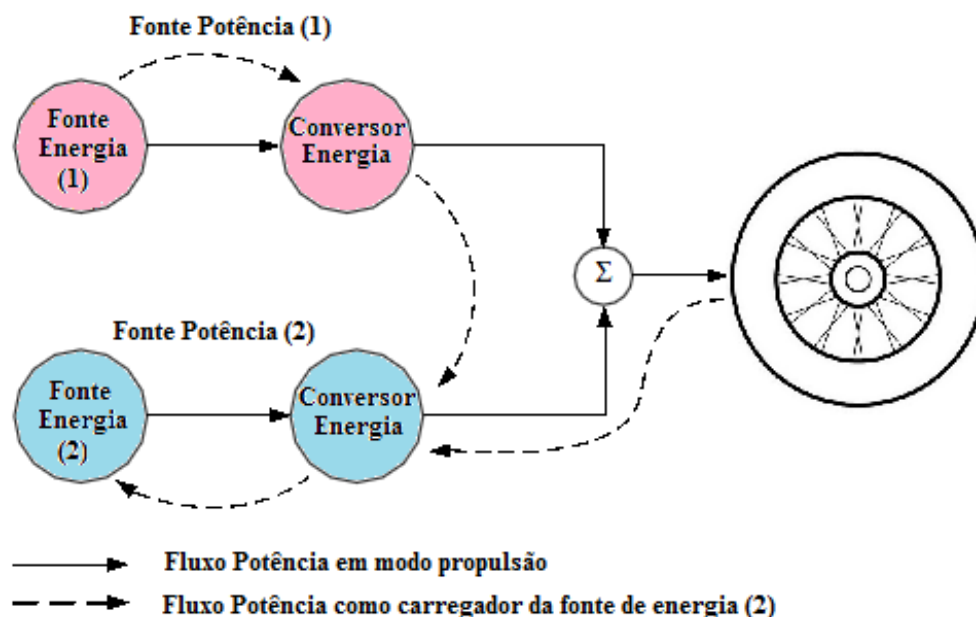


Figura 2.11 | Representação conceptual de um veículo híbrido elétrico. [3]

A figura apresenta, do ponto de vista conceptual, o fluxo de potência de um veículo híbrido elétrico com duas fontes de energia distintas e independentes. No caso de uma hibridização em que a fonte (1) é de combustão (combustível e motor de combustão interna) e a fonte (2) é elétrica (bateria e motor elétrico), estamos na presença de um HEV - veículo híbrido elétrico. Como é possível observar existe várias formas de combinar o fluxo de potência de forma a satisfazer as necessidades de performance do veículo:

### 1. A fonte (1) sozinha fornece potência às rodas:

O motor de combustão interna é o único responsável pela propulsão do veículo. Esta situação pode ocorrer quando as baterias estiverem completamente descarregadas e o motor de combustão não tiver capacidade para carregar as baterias, ou quando as baterias estiverem completamente carregadas e o motor de combustão consegue sozinho fornecer a potência requerida pelo veículo.

### 2. A fonte (2) sozinha fornece potência às rodas:

Apenas o motor elétrico é responsável pela propulsão do veículo, neste caso está a funcionar como um veículo puramente elétrico. Esta situação pode ocorrer quando o motor de combustão interna não consiga ser eficiente devido ao veículo se deslocar a baixas velocidades ou circular em áreas em que as emissões de gases são restritas.

### 3. As duas fontes, em simultâneo, fornecem potência às rodas:

O motor de combustão interna e o motor elétrico são ambos responsáveis pela propulsão do veículo. É uma situação de propulsão híbrida importante quando é

requerida mais potência pelo veículo para obter uma maior aceleração ou vencer uma inclinação íngreme.

#### 4. A fonte (2) obtém potência através das rodas (travagem regenerativa):

Através de um dispositivo mecânico é possível transformar a energia cinética libertada durante a travagem em energia elétrica. Assim a energia elétrica gerada durante a travagem é armazenada nas baterias para ser usada quando necessário.

#### 5. A fonte (2) obtém potência da fonte (1):

Nesta situação o motor de combustão interna apenas é usado para carregar as baterias.

#### 6. A fonte (2) obtém potência em simultâneo do motor de combustão e das rodas:

Neste modo as baterias são carregadas quer pelo motor de combustão interna quer pela travagem regenerativa.

#### 7. A fonte (1) fornece potência às rodas e à fonte (2) em simultâneo:

O motor de combustão interna é simultaneamente responsável pela propulsão do veículo e pelo carregamento das baterias.

#### 8. A fonte (1) fornece potência à fonte (2) e esta às rodas:

Neste modo o motor de combustão elétrica carrega as baterias, e estas por sua vez fornecem energia ao motor elétrico, que será responsável pela propulsão do veículo.

#### 9. A fonte (1) fornece potência às rodas e estas à fonte (2):

O motor de combustão é o responsável pela propulsão do veículo, sendo as baterias carregados por travagem regenerativa.

Com os diferentes modos de operação, um veículo híbrido torna-se muito mais flexível do que um veículo convencional. Com uma configuração e controlo apropriado, aplicada de forma específica para cada condição de operação é possível otimizar o desempenho global, a eficiência e os níveis de emissões poluentes. [3]

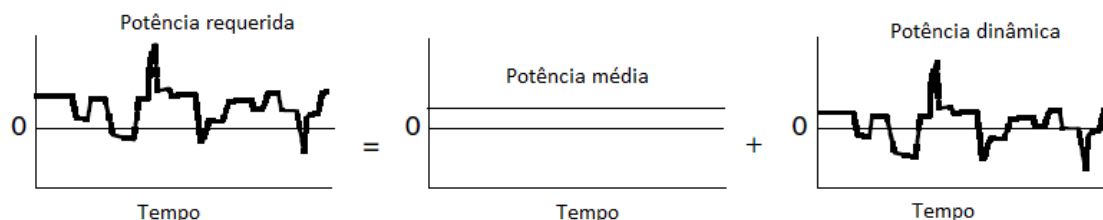


Figura 2.12 | Representação da potência total em potência média (constante) e dinâmica. [3]

O nível de potência requerido por um veículo varia muito durante o seu período de funcionamento real devido às contantes acelerações, desacelerações, subidas e descidas. O nível de potência requerido pelo veículo, na prática, pode ser dividido em



duas componentes: a potência média (com valor constante) e a potência dinâmica como podem ser observadas na Figura 2.12. Num veículo híbrido uma das fontes de energia irá favorecer o requerimento de potência média (motor de combustão interna) e a outra a potência dinâmica (motor elétrico). [3]

## 2.5 Como categorizar os veículos híbridos elétricos (HEVs)

Os HEVs podem ser categorizados de variadas formas que vão desde as ligações mecânicas (configurações), pelo seu nível de hibridização, nível de potência elétrica e funções do motor elétrico, ou ainda pelo método de reabastecimento energético.

### 2.5.1 Configurações disponíveis para um veículo HEV

A escolha da configuração de um HEV é influenciada por vários fatores, que limitam os projetos e afetam as performances do veículo. Derivado a isso, a configuração a ser escolhida para um veículo HEV é fundamental e deve ser analisada ainda na parte do projeto. O motor de combustão interna, o motor elétrico, o sistema de armazenamento de energia, o conversor de potência e o sistema de transmissão às rodas são elementos comuns em todos os HEV sendo necessário uma coordenação muito cautelosa do fluxo de energia entre as diversas partes envolvidas.

As configurações base são classificadas com base na interligação entre as duas fontes de energia: híbrido série, híbrido paralelo e híbrido série-paralelo. [18]

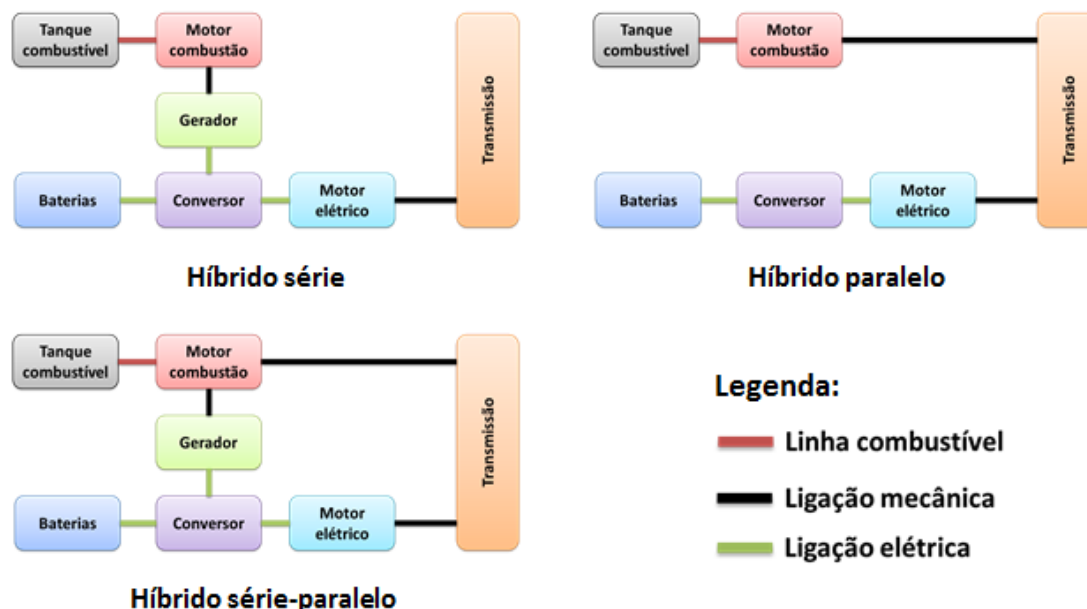


Figura 2.13 | Veículos híbridos - Configuração bases dos HEVs. [1]

As designações destas configurações foram recentemente alteradas pela SAE (*Society of Automotive Engineers*). Os híbridos séries passaram a ser denominados como veículos elétricos com extensor de autonomia (*E-REV - Extended Range Electric Vehicle*). Sendo assim, os veículos que são considerados híbridos passam a ser apenas os híbridos paralelos e os híbridos série-paralelo. [12]

### 2.5.1.1 Híbrido Série (elétrico com extensor de autonomia)

Um veículo com esta configuração é essencialmente um veículo elétrico com um carregador de baterias a bordo. O motor de combustão interna (MCI) trabalha no seu ponto de funcionamento ótimo, sendo responsável por mover um gerador elétrico que produz energia elétrica. Esta energia pode ser utilizada de duas formas: carregamento das baterias ou para acionamento do motor elétrico. De forma a manter o nível de energia das baterias num valor pré-determinado (65 a 75% da capacidade total) o MCI entra em funcionamento sempre que necessário. Como é possível observar na figura a propulsão do veículo será de inteira responsabilidade do motor elétrico, pelo que não existe qualquer ligação mecânica entre o motor de combustão interna e as rodas motrizes. [8]

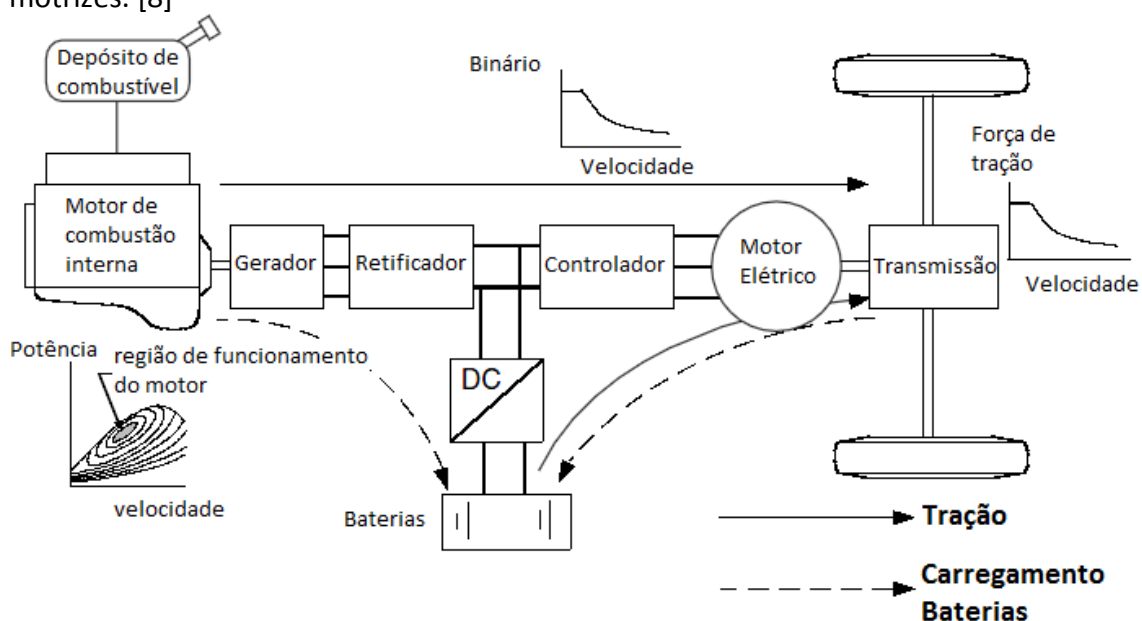


Figura 2.14 | Configuração de um híbrido série (elétrico com extensão de autonomia). [3]

Com esta solução o MCI pode funcionar a uma velocidade e carga constante, situação que lhe permite operar num regime ótimo de funcionamento melhorando a sua eficiência, reduzindo o consumo de combustível, o ruído e as suas emissões poluentes. [18]

Durante a desaceleração ou travagem o motor elétrico pode funcionar como gerador de energia elétrica, esta energia (sob forma de corrente elétrica) é depois usada para carregar as baterias. [21]

Este tipo de configuração tem potencialmente os seguintes modos de funcionamento: [9]

1. Com o motor de combustão interna desligado, o motor elétrico é o único responsável pela propulsão do veículo, sendo alimentado pelas baterias;
2. O motor elétrico, responsável pela propulsão do veículo, recebe energia proveniente apenas do conjunto motor de combustão interna e gerador elétrico;

3. A propulsão do veículo pode ser garantida pela combinação dos dois últimos modos, isto é, o motor elétrico será alimentado quer pelo conjunto motor de combustão interna e gerador elétrico quer também pelas baterias;
4. O conjunto motor combustão interna e gerador alimenta quer as baterias quer o motor elétrico;
5. O conjunto motor de combustão e gerador apenas alimentam as baterias, sendo que o motor elétrico está desligado, não existindo propulsão;
6. Travagem regenerativa, quer conjunto motor de combustão e gerador quer o motor elétrico funcionam como geradores carregando as baterias.

A configuração híbrido série (elétrico com extensor de autonomia) apresenta uma série de vantagens: [3]

- Como o motor de combustão interna não está ligado às rodas motrizes, permite que este funcione num regime de funcionamento ótimo, que permite uma melhor eficiência, economia de combustível, redução de ruído e emissões poluentes;
- Existe apenas uma única fonte de binário motor para as rodas motrizes, simplificando desta forma o controlo de velocidade do veículo;
- Como a relação binário/velocidade de rotação do motor elétrico é muito próxima da ideal, ele não necessita de uma caixa de velocidades, permitindo uma simplificação de construção e de redução de custos;

Contudo, esta configuração tem algumas desvantagens: [3]

- Duas conversões distintas de energia (energia mecânica do motor de combustão para energia elétrica através do gerador, e de novo para energia mecânica através do motor elétrico);
- Necessidade de possuir duas "máquinas térmicas" (um gerador e um motor elétrico);
- O motor de tração (motor elétrico) geralmente é de grandes dimensões para que as suas características cumpram os requisitos do sistema;
- Baixo rendimento da conversão de energia, contudo superior a um veículo convencional.

### **2.5.1.2 Híbrido Paralelo**

Com a configuração híbrido paralelo tanto o motor de combustão interna como o motor elétrico estão conectados, em paralelo, à transmissão. A propulsão do veículo pode ser assegurada assim quer pelo motor de combustão interna quer pelo motor elétrico, ou ainda pelos dois em simultâneo, sendo possível escolher qualquer uma destas combinações de modo a alimentar o veículo com o binário requerido. [8] O binário motor será obtido pela soma dos binários fornecidos por cada um dos motores. [22]

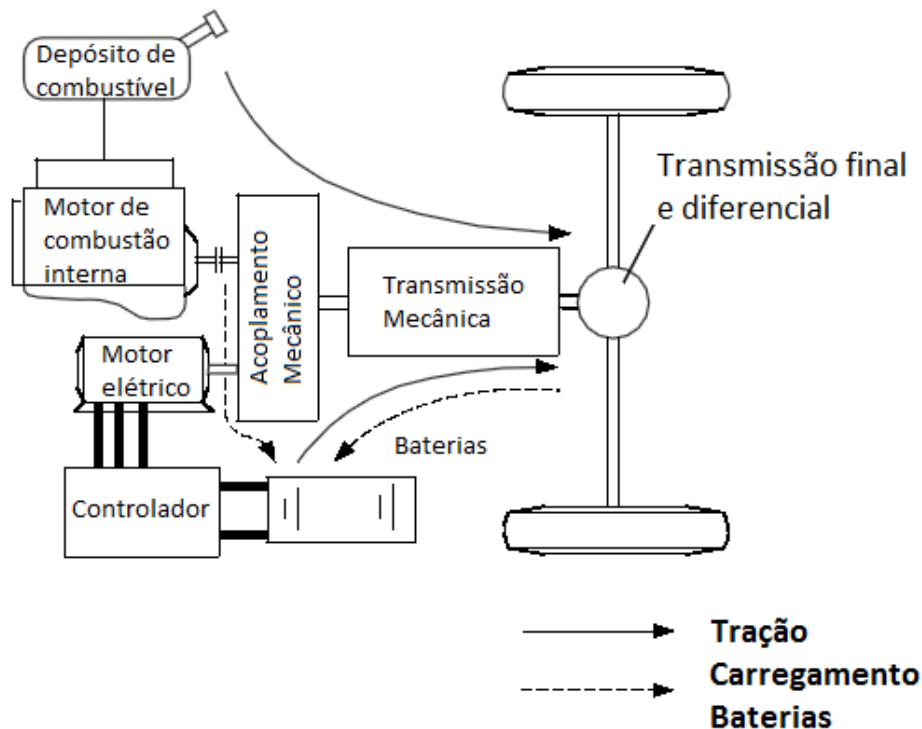


Figura 2.15 | Configuração de um híbrido paralelo. [3]

Se a potência requerida pelo veículo for superior à potência que o motor de combustão interna tem à sua saída, o motor elétrico será ligado, desta forma quer o motor de combustão interna quer o motor elétrico fornecem binário à transmissão. No caso da potência requerida ser inferior à potência que o motor de combustão interna tem à sua saída, a energia restante é utilizada no carregamento das baterias. O conceito de "Travagem Regenerativa" é possível de ser aplicado neste tipo de configuração, o motor elétrico é usado como gerador permitindo assim o carregamento das baterias. [23]

Este tipo de configuração tem potencialmente os seguintes modos de funcionamento: [3]

1. O motor de combustão interna é desligado e a propulsão do veículo é assegurada pelo motor elétrico;
2. O motor de combustão interna é o responsável pela propulsão do veículo, estando o motor elétrico desligado;
3. Modo em que quer o motor de combustão interna quer o motor elétrico fornece o binário propulsor ao veículo;
4. O motor elétrico é o responsável quer pela propulsão do veículo quer pelo carregamento das baterias;
5. Modo de carregamento estacionário, onde apenas são carregadas as baterias, com o veículo parado;
6. Travagem regenerativa, modo em que o motor de combustão interna está desligado ou desacoplado. O motor elétrico funciona como gerador, sendo que a energia cinética ou potencial do veículo é convertida em energia elétrica e usada para carregar as baterias.

A configuração híbrido paralelo apresenta uma série de vantagens: [9]

- Como quer o motor de combustão interna quer o motor elétrico fornecem diretamente binário às rodas motrizes e não existe conversão de energia, proporciona que as perdas de energia sejam menores;
- Menor atravancamento devido a não ser necessário a existência de um gerador elétrico, e devido também à menor dimensão do motor elétrico.

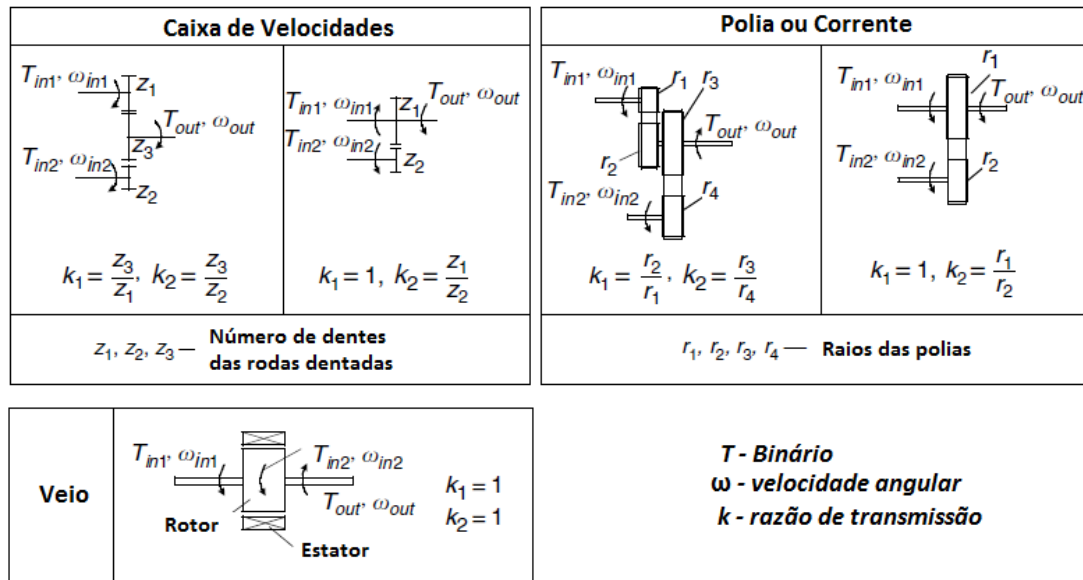


Figura 2.16 | Tipos de acoplamentos mecânicos mais utilizados. [3]

Na Figura 2.16 estão representados os diferentes tipos de acoplamento mecânico mais utilizados. [3]

Contudo, esta configuração tem algumas desvantagens:

- Devido ao acoplamento mecânico entre o motor de combustão interna e as rodas motrizes, o motor de combustão interna não pode operar sempre num regime ótimo de funcionamento, e assim as embraiagens são necessárias; [24]
- A maior complexidade da estrutura e do controle; [9]
- Configuração com custos mais elevados;
- Necessita de alta voltagem para ser mais eficiente. [23]

### 2.5.1.3 Híbrido Série-Paralelo

Esta configuração incorpora as características das outras duas configurações atrás definidas: híbrido série (elétrico com extensor de autonomia) e o híbrido paralelo.

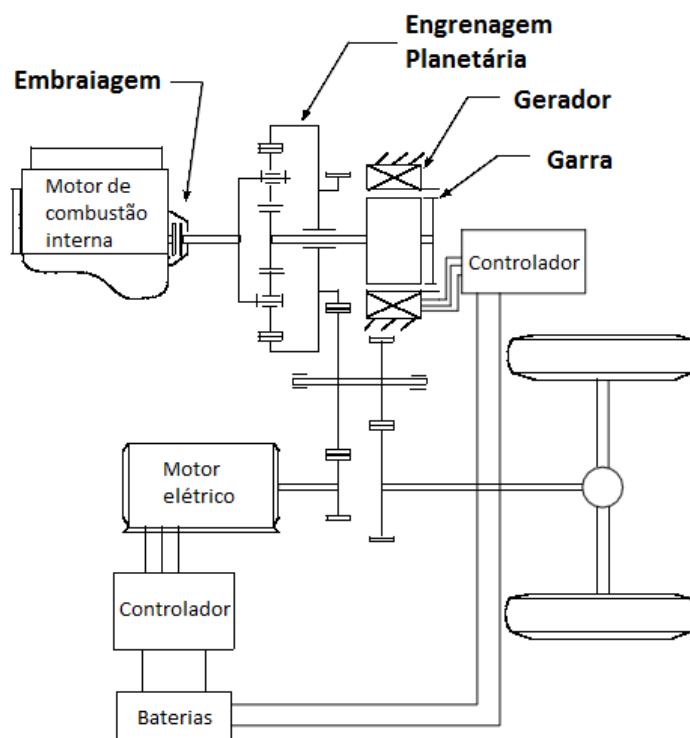


Figura 2.17 | Configuração de um híbrido série-paralelo. [3]

Comparando a esta configuração com a configuração em série, a configuração série-paralelo apresenta uma ligação mecânica adicional entre o motor elétrico e o gerador. Por seu lado, em comparação com a configuração em paralelo, apresenta um gerador adicional. [8]

A conjugação destas duas configurações (série e paralelo) em conjunto com um mecanismo divisor de potência permitem a transferência de potência do motor de combustão para as rodas motrizes. Esse mecanismo divisor de potência não é mais do que um conjunto de engrenagens planetárias que permite a ligação entre as duas máquinas elétricas (motor elétrico e gerador) com o motor de combustão interna.

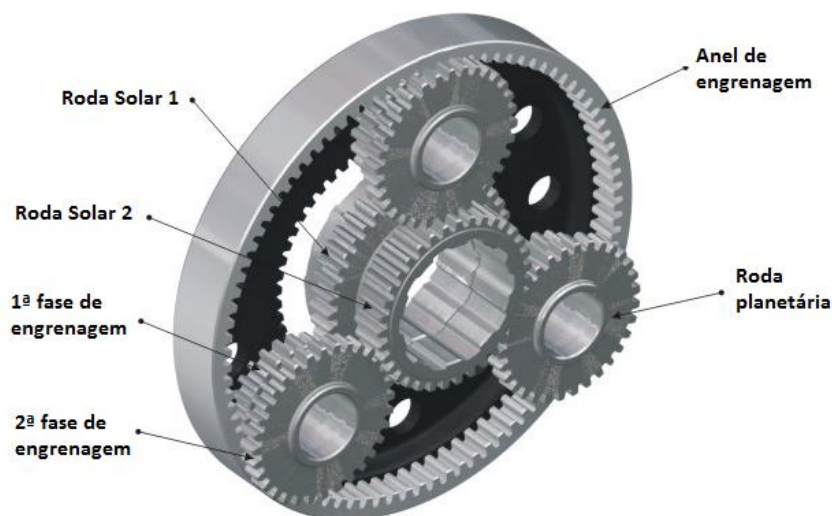
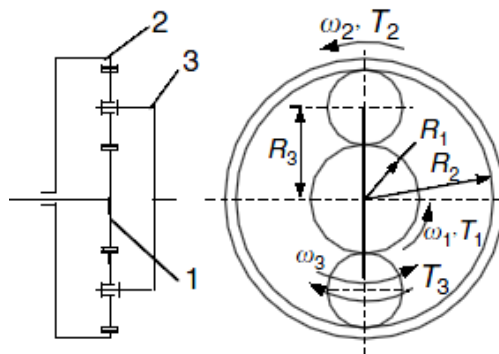


Figura 2.18 | Engrenagem Planetária.[25]

Devido à ligação entre a roda solar e as rodas planetárias, a velocidade do motor de combustão pode ser ajustada através da variação da velocidade do gerador. Na Figura 2.19,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  representam os binários, e  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  e  $\omega_3$  representam as diferentes velocidades de rotação, ainda  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  representam o raio primitivo de cada engrenagem. [23]



**Equações entre velocidades angulares**

$$\omega_3 = \frac{R_1}{2R_3} \omega_1 + \frac{R_2}{2R_3} \omega_2 \quad k_1 = \frac{R_1}{2R_3}$$

**Equações entre binários**

$$T_3 = \frac{2R_3}{R_1} T_1 = \frac{2R_3}{R_2} T_2 \quad k_2 = \frac{R_2}{2R_3}$$

Figura 2.19 | Engrenagem Planetária e respectivas equações de velocidade rotação e binário.[9]

Quando a velocidade do gerador/motor é negativa (sentido oposto ao binário), este produz energia elétrica (modo gerador). A potência do motor de combustão interna é dividida em duas partes, uma parte é transferida para a transmissão e a outra parte é transferida para o gerador. Pelo contrário, quando a velocidade do gerador/motor é positiva, este trabalha em modo de motorização, adicionando potência às rodas motrizes. Desta forma, a velocidade do motor de combustão interna pode ser ajustado para a zona de regime ótimo através do controlo do gerador/motor. A função do gerador/motor pode ser removida da transmissão, através do bloqueio do estator e o rotor do gerador/motor juntos e cortando a sua energia. Desta forma, a unidade de engrenagem planetária funciona como uma simples caixa de velocidades com uma relação de transmissão fixa. Outra fonte de binário é o motor elétrico que fornece diretamente binário às rodas motrizes.

Com a configuração série-paralelo é possível combinar as vantagens de ambas as configurações: série e paralelo. Contudo, é necessário lembrar que necessita de uma máquina elétrica adicional e de uma engrenagem planetária o que aumenta a complexidade e custo desta solução. [9]

#### 2.5.1.4 Comparação entre as diferentes configurações

Na Tabela 2.3 são comparadas as três configurações mais com um veículo convencional (propulsão MCI):

**Tabela 2.3 | Comparação entre as diferentes configurações com um veículo convencional.[26]**

<b>Configurações vs. Características</b>	<b>Série (elétrico com extensor de autonomia)</b>	<b>Paralelo</b>	<b>Série - Paralelo</b>
<b>Eficiência circuito urbano</b>	<b>+ +</b>	<b>+</b>	<b>+ +</b>
<b>Eficiência circuito extraurbano</b>	<b>+</b>	<b>+ +</b>	<b>+ +</b>
<b>Potencial de redução de emissões</b>	<b>+ +</b>	<b>+</b>	<b>+ +</b>
<b>Custo</b>	<b>- -</b>	<b>-</b>	<b>- -</b>
<b>Complexidade</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>- -</b>
<b>Facilidade de Controlo</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>- -</b>

Após a apresentação das configurações série (elétrico com extensor de autonomia), paralelo e série-paralelo, é necessário fazer uma comparação entre elas de forma a analisar e perceber em que situações a sua aplicação é a mais indicada.

Em termos de consumo e emissões, a configuração série é a mais adequada para situações em que a potência média requerida pelo veículo seja menor e as velocidades não sejam elevadas, por exemplo num circuito urbano. A configuração paralelo possui maior eficiência energética quando a potência média requerida pelo veículo e a sua velocidade são mais elevadas, ou seja, em circuito extraurbanos. Quanto à configuração série-paralelo, ela consegue unir as vantagens das duas configurações atrás descritas podendo retirar partido dessa capacidade, contudo tem um grau de complexidade maior o que dificulta o controlo. [27]

Foi realizado um estudo por *Xin e S. Williamson*, em que estes comparavam a eficiência energética das configurações série e paralelo. Nesse estudo, eles tomaram em consideração as perdas em cada elemento da transmissão. Na Figura 2.20 e Figura 2.21 são apresentadas as perdas desses elementos e a eficiência final de cada uma das configurações.

Na Figura 2.20 é possível observar que quando o MCI (motor de combustão interna) opera na região ótima de funcionamento, a eficiência máxima é de cerca de 35%. Utilizando baterias e conversores disponíveis comercialmente, o máximo de eficiência é tipicamente cerca de 80%.

Assim a máxima eficiência que se consegue obter numa configuração série é de cerca de 25%, obtida pela multiplicação de cada valor de eficiência de cada um dos seus elementos de potência.



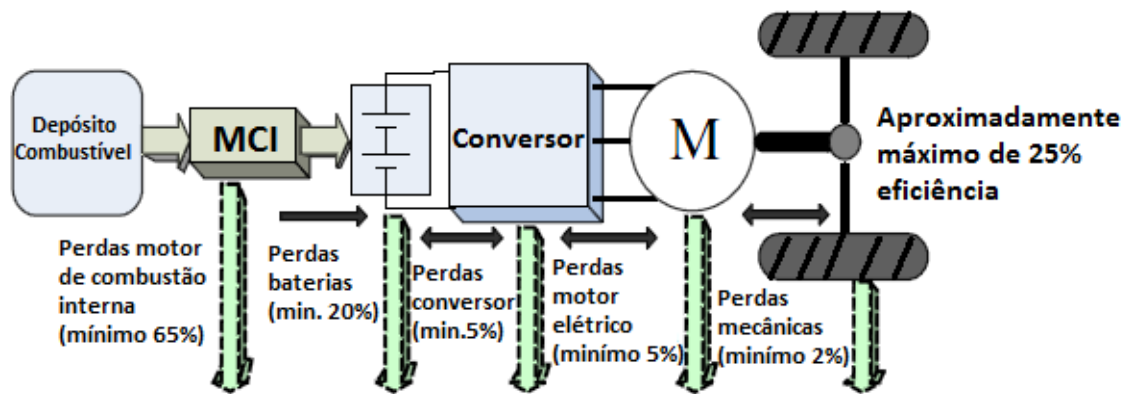


Figura 2.20 | Cálculo aproximado da máxima eficiência de transmissão teórica.[28]

Em alternativa a Figura 2.21 mostra as perdas de cada um dos elementos constituintes de uma configuração paralelo.

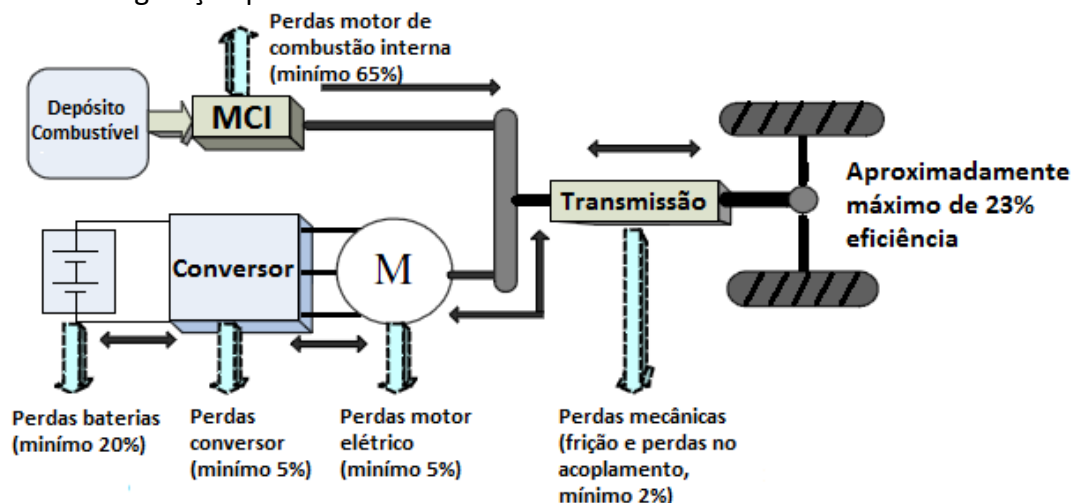


Figura 2.21 | Cálculo aproximado da máxima eficiência de transmissão teórica.[28]

Tendo por finalidade a comparação dos dois tipos de configurações, todos os componentes de alimentação utilizados quer na configuração série quer na paralelo são iguais. Assim tem especial importância ressaltar que a configuração paralelo possui dois canais de fluxo de potência independentes (motor elétrico e motor de combustão interna), logo a eficiência final virá, teoricamente, multiplicada por um fator de dois. A configuração paralelo apresenta então uma eficiência máxima de cerca de 46%.

É possível concluir que a configuração em série apresenta um menor rendimento energético quando comparado com a configuração paralelo. Contudo é possível melhorar o rendimento na configuração em série, utilizando motores térmicos mais eficientes, controlos mais inteligentes, melhor utilização da travagem regenerativa, entre outros. [28]

### 2.5.2 Grau de Hibridização

Os veículos híbridos (paralelo e série-paralelo) podem ser categorizados pelo chamado grau de hibridização. Na prática, o grau de hibridização, mede a percentagem da potência elétrica face à potência total presente no veículo (potência de tração). Nesta classificação é também considerada a função do motor elétrico no funcionamento do veículo. Para facilitar a categorização é comum introduzir o conceito de fator de hibridização ( $HF$ ).

$$HF = \frac{P_{ME}}{P_{ME} + P_{MCI}} \quad (1)$$

Onde  $P_{ME}$  representa a potência máxima do motor elétrico e  $P_{MCI}$  representa a potência máxima do motor de combustão interna. Na Figura 2.22 está representada a classificação dos HEVs por  $HF$  (fator de hibridização), onde o extremo esquerdo está o veículo convencional ( $HF=0$ ) e no extremo direito o veículo elétrico ( $HF=1$ ).[29]

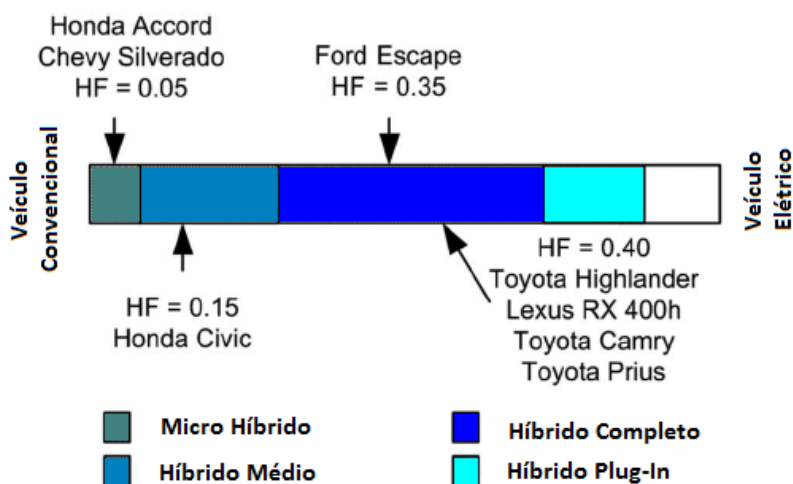


Figura 2.22 | Classificação em função da potência elétrica e das funcionalidades do motor elétrico.[29]

De acordo com o nível de potência elétrica e função do seu motor elétrico, os HEVs podem ser classificados nas seguintes categorias:

#### 2.5.2.1 Micro Híbrido

Os veículos micro híbridos usam um motor elétrico com uma potência limitada (até 2,5 kW a 12 V de tensão) como um alternador de arranque, sendo que o motor de combustão interna é o responsável por assegurar a propulsão do veículo. O motor elétrico ajuda o motor de combustão interna a obter melhores performances no arranque, pois devido a dinâmica dos motores elétricos, os micro híbridos tem um funcionalidade de "stop-and-go". Esta funcionalidade permite que o motor de combustão interna pode estar desligado quando o veículo se encontra em ponto morto (por exemplo, quando se aguarda a luz verde num semáforo). A melhoria estimada na

economia de combustível deve rondar entre os 2% - 10% para veículos em circuitos urbanos. Um dos exemplos comerciais é o *Citroën C3* micro híbrido. [24]



Figura 2.23 | Micro híbrido Citroën C3 [30]

### 2.5.2.2 Híbrido médio

A potência típica do motor elétrico para um veículo híbrido médio é cerca de 10 a 20 kW para valores de tensão de 100 a 200 V. As características deste motor elétrico permitem que adicionalmente à função de "stop-and-go", este veículo possua a uma função impulso. Esta função permite que o motor elétrico ajude o motor de combustão interna na propulsão do veículo, quer na aceleração quer na travagem aplicando um binário suplementar. As baterias, no veículo híbrido médio, podem ser carregadas usando travagem regenerativa. Contudo, o motor elétrico não pode assumir sozinho a responsabilidade da propulsão do veículo. A melhoria estimada na economia de combustível deve rondar entre os 10% - 20%. Os modelos *Honda Civic* e o *Honda Insight* são exemplos de híbrido médio. [24]



Figura 2.24 | Híbrido médio Honda Insight, [31]

### 2.5.2.3 Híbrido Completo

Num veículo híbrido completo, o motor elétrico é dotado de uma potência de cerca de 50 kW para uma tensão entre 200 a 300 V. O motor elétrico pode sozinho ser responsável pela tração do veículo, o que permite que seja um veículo livre de emissões poluentes na sua utilização (ZEV - Zero emission vehicle). Esta característica pode ser bastante importante nos centros urbanos, dadas as limitações impostas por várias cidades ao tráfego e a poluição. Contudo, a propulsão do veículo pode também ser assegurada sozinha pelo MCI ou conjuntamente pelo MCI e pelo motor elétrico. A melhoria estimada na economia de combustível deve rondar entre os 20% - 50%. Temos como exemplo o modelo *Toyota Prius*. [24]



Figura 2.25 | Híbrido completo Toyota Prius. [32]

## 2.5.3 Classificação em função do método de reabastecimento

### 2.5.3.1 Em postos de abastecimento

Este tipo de veículo é reabastecido com gasolina ou gásóleo num posto de abastecimento. A maioria dos veículos HEVs presentes no mercado pertence a esta categoria.

### 2.5.3.2 Híbrido "Plug-In"(PHEV)

Um veículo híbrido *plug-in* (PHEV) é um veículo elétrico com a capacidade de extrair e armazenar energia a partir de uma rede elétrica. É "somente" uma evolução do conceito de veículo híbrido elétrico, sendo que esta nova função permite combinar a energia de combustíveis fósseis com uma variedade de fontes de energia elétrica. Esta nova característica é importante e terá impacto no consumo de petróleo, emissões de gases poluentes, mas também no desempenho e composição da rede elétrica. [33]

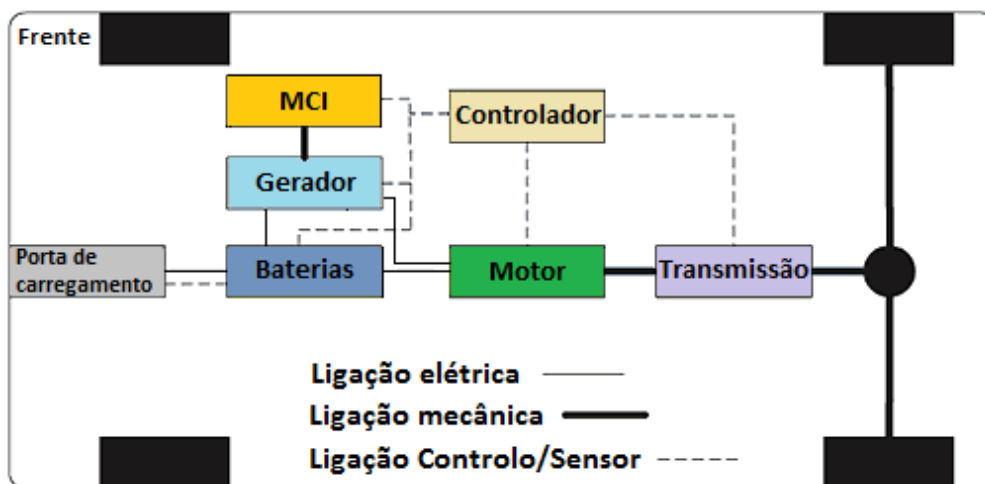


Figura 2.26 | Esquema de um híbrido série (elétrico com extensor de autonomia) "plug-in". [34]

Os veículos híbridos "plug-in" têm um sistema de armazenamento de energia que pode ser completamente carregado através de uma tomada elétrica comum. Este sistema de armazenamento de energia é o responsável pela propulsão do veículo híbrido elétrico para distâncias curtas. Em distâncias mais longas, e uma vez atingido um determinado estado de carga (*SOC - State of charge*), o veículo passa para modo híbrido. [7]

A configuração de um veículo híbrido "*plug-in*" incorpora um MCI e um motor elétrico, e tal como nos HEVs convencionais estes componentes podem estar em configurações série (elétrico com extensor de autonomia), paralelo ou série-paralelo. [33] No caso da Figura 2.26 estamos na presença de um esquema híbrido série "*plug-in*".

O veículo híbrido série "*plug-in*" utiliza uma rede de energia elétrica comum para recarregar as baterias. Ele utiliza um gerador elétrico alimentado por um pequeno motor de combustão interna para aumentar o alcance (distância percorrida) pelo veículo. Neste tipo de configuração, o motor de combustão interna pode ser utilizado para carregar as baterias, para alimentar diretamente o motor elétrico ou realizar as duas tarefas em simultâneo. [35]



Figura 2.27 | Chevrolet Volt híbrido "Plug-in". [15]

## 2.6 Tecnologias tipicamente utilizadas nos veículos híbridos

Os veículos híbridos elétricos utilizam algumas inovações tecnológicas que lhes permitem realizar poupanças adicionais no consumo de combustível e na diminuição de emissões de gases poluentes. [36]

### 2.6.1 Travagem regenerativa

Uma das características mais importantes dos veículos elétricos híbridos é a sua capacidade de recuperar quantidades significativas de energia na travagem, através da chamada travagem regenerativa. O motor elétrico dos veículos híbridos podem ser controlados para passarem a atuar como gerador durante a travagem, convertendo energia cinética do veículo em energia elétrica que pode ser guardada no sistema de armazenamento de energia, para mais tarde ser reutilizada. Num veículo convencional, toda a energia cinética seria desperdiçada sob a forma de calor como é possível observar na Figura 2.28. [3]



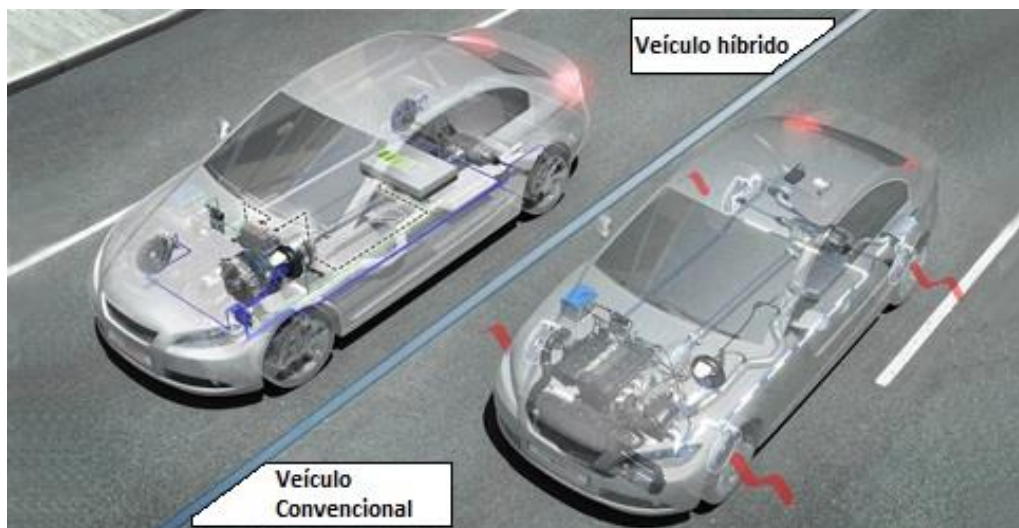


Figura 2.28 | Sistema travagem de um veículo híbrido e de um veículo convencional. [37]

Usualmente, a travagem regenerativa é utilizada apenas no eixo motor do HEV. A travagem mecânica do eixo motor e do eixo movido são perdas de energia, assim como as perdas resultantes da transmissão e do gerador elétrico, conforme é demonstrado na Figura 2.29.

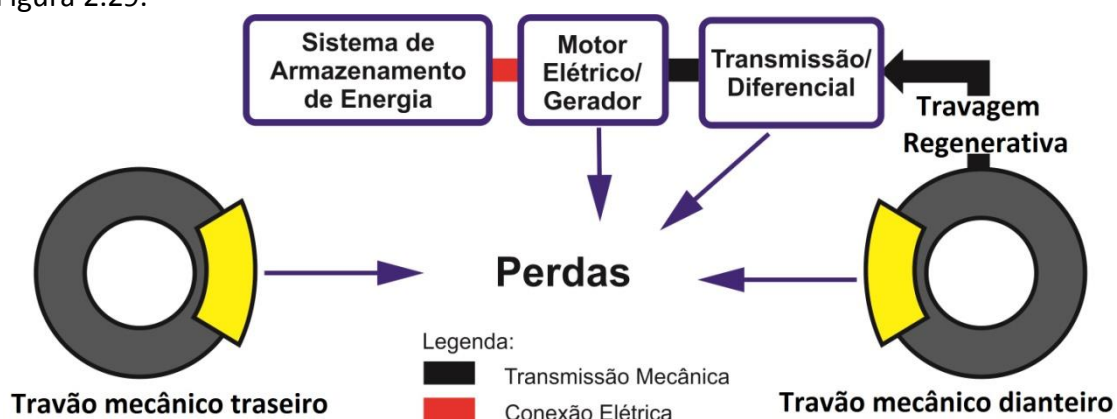


Figura 2.29 | Travagem Regenerativa. [38]

No entanto, o desempenho de travagem de um veículo afeta diretamente a segurança do veículo. Numa situação de travagem de emergência, o sistema de travagem do veículo deve garantir que: o veículo deve parar na menor distância possível, e manter o controlo da direção do mesmo. Para a primeira situação, o sistema de travagem deve ser capaz de fornecer um binário de travagem suficiente em todas as rodas, enquanto que para a segunda situação, exige que esta força de travagem seja igualmente distribuída por todas as rodas. Geralmente, o binário requerido na travagem é maior do que o binário que o motor elétrico consegue produzir, logo assim nos veículos híbridos, o sistema de travagem mecânico tem de coexistir com a travagem regenerativa elétrica. Torna-se necessário então que exista um controlo efetivo, para que os dois sistemas atuem de forma conjunta e eficiente. [3]

Este controlo efetivo pode ser materializado de duas formas distintas:

- Travagem Regenerativa em Paralelo

Nesta situação o motor elétrico (funcionando como gerador) e o travão mecânico trabalham em simultâneo com o objetivo de reduzir a velocidade do veículo. O sistema

de travagem mecânico é controlado, como no caso convencional, diretamente pelo pedal do travão, transformando parte da energia cinética em calor. Embora não seja o método mais eficiente de travagem regenerativa, possui vantagens como a simplicidade de controlo, facilidade de implementação e baixo custo. Uma outra vantagem é no aspeto da segurança, pois em caso de falha no sistema de travagem regenerativa, o sistema mecânico serve como apoio. [36]

- Travagem Regenerativa em Série

Na travagem regenerativa em série o grande objetivo passa pela utilização do motor elétrico como redutor da velocidade. Sempre que a força de travagem solicitada for menor do que a força disponibilizada pelo motor elétrico, a redução de velocidade ocorre somente através da regeneração de energia, funcionando o motor elétrico como gerador de energia. Se a força de travagem solicitada for superior à força disponibilizada pelo motor elétrico, este opera para reduzir a velocidade com o seu binário máximo e o restante é aplicado pelo sistema de travagem mecânico. [3] A principal vantagem deste método é a maior eficiência, já que mais energia cinética é convertida em energia elétrica. As desvantagens são o seu elevado custo associado à complexidade do controlo. Este sistema exige ainda a presença de um sistema de travagem mecânico redundante para o caso de falha do sistema de travagem regenerativo. [36]

### 2.6.2 "Start and Stop" automático

Com esta tecnologia, o motor de combustão interna é automaticamente desligado no momento em que o veículo para e o carro se encontra em ponto morto, e entra de novo em funcionamento assim que o pedal da embraiagem for pressionado. O objetivo desta tecnologia é diminuir a energia desperdiçada quando o veículo se encontra parado, prevendo-se uma poupança de cerca de 10% de combustível nestas situações, bem como redução de emissões poluentes, ruído, maior conforto e segurança para os ocupantes. [21]



Figura 2.30 | Funcionamento da tecnologia "Start and Stop da Audi". [39]

### 2.6.3 Assistência elétrica

O motor elétrico fornece potência adicional para ajudar o motor de combustão interna na aceleração. Esta capacidade permite a utilização de um motor de combustão interna

de menores dimensões. Em alguns casos, o motor elétrico fornece potência quando o veículo circula a baixas velocidades, pois é precisamente a zona de funcionamento em que o motor de combustão interna é menos eficiente. [21]

## 2.7 Comparação entre HEVs: Micro, Médio, Completo e "Plug-in" vs. Tecnologia

Tabela 2.4 | Cortesia da Power System Design. [40]

Funções / Tecnologia	Micro Híbrido	Híbrido Médio	Híbrido Completo	Híbrido "Plug-in"	Puramente Elétrico
<i>Start and Stop</i>	☑	☑	☑	☑	☑
<b>Travagem Regenerativa</b>		☑	☑	☑	☑
<b>Assistência Elétrica</b>		☑	☑	☑	☑
<b>Energia elétrica para médias distâncias</b>			☑	☑	☑
<b>Energia elétrica para longas distâncias e recarregamento em rede elétrica</b>				☑	☑
<b>Economia de energia [%]</b>	5-10 (até 25 em cidade)	10-25	25-40	50-100	100
<b>Potência Elétrica [kW]</b>	1.5-10	5-20	30-75	70-100	30-100
<b>Exemplos de veículos</b>	<i>Citroën C3</i>	<i>Honda Civic</i>	<i>Toyota Prius</i>	<i>GM Volt</i>	<i>Nissan Leaf</i>

Na análise à tabela é possível concluir que o PHEV (híbrido elétrico *plug-in*) é seguramente o mais completo, não só a nível das funcionalidades, bem como ao nível da autonomia. Como já foi anteriormente referido essa é uma das principais limitações dos veículos puramente elétricos, situação que não se verifica com o PHEVs dado possuírem duas fontes de energia. O sistema de armazenamento de energia é o responsável pela propulsão do veículo híbrido elétrico para distâncias curtas. Em distâncias mais longas, e uma vez atingido um determinado estado de carga, o veículo passa para modo híbrido. Ao nível da economia de combustível e emissão de gases poluentes, o PHEV tem também uma vantagem sobre o micro híbrido, o híbrido médio e o híbrido completo. Relativamente ao EV, o híbrido "plug-in" estará ligeiramente atrás ao nível das emissões de gases poluentes durante a sua utilização. No entanto é importante ressaltar que hoje em dia, o tema de emissões de gases poluentes não se resume ao período de utilização do veículo, mas de uma forma geral desde o período de conceção até ao abate do veículo.



## 2.8 Principais Componentes dos HEVs

Os veículos híbridos, tal como os veículos convencionais, possuem uma grande quantidade de componentes. Entre esses componentes, três deles destacam-se quer pela importância no funcionamento do veículo quer pelo custo associado. São eles o motor de combustão interna, o motor elétrico (que pode ser usado como gerador) e o sistema de armazenamento de energia.

### 2.8.1 Motor de Combustão Interna

O motor de combustão interna (funcionando a pistão) foi inventado no século XIX, revolucionando toda a sociedade e nível de vida da população. Este é definido como uma máquina térmica, pois transforma energia térmica em energia mecânica útil. a energia térmica provém da combustão de uma mistura combustível-comburente, que liberta a energia química do combustível (na maioria das máquinas, o ar é o comburente). [41]

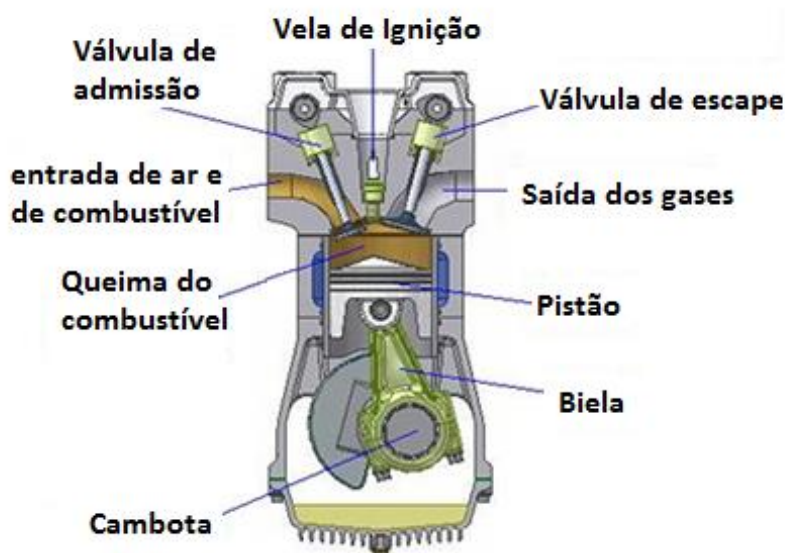


Figura 2.31 | Sistema biela-manivela, motor de combustão interna. [42]

O motor de combustão interna aproveita o aumento de pressão que resulta da combustão do combustível-comburente para provocar um movimento de rotação do veio do motor. O motor é constituído por cilindros como o da Figura 2.31, dentro dos quais deslizam pistões ligados a uma cambota (veio motor) pelas bielas. O movimento de rotação da cambota, origina a subida e descida dos pistões dos diversos cilindros, inversamente, a pressão a que é submetido o pistão faz rodas a cambota. Para garantir que o motor não para quando o pistão está a comprimir e para garantir um movimento regular, a cambota possui um volante de energia que acumula energia cinética numa das suas extremidades. O ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro denomina-se de ponto morto superior ou *PMS*. Ao ponto mais baixo que o pistão pode atingir dentro do cilindro denomina-se de ponto morto inferior ou *PMI*. Assim a distância percorrida entre o *PMS* e o *PMI* é denominado de curso, sendo que o raio da manivela é metade do curso. [41]

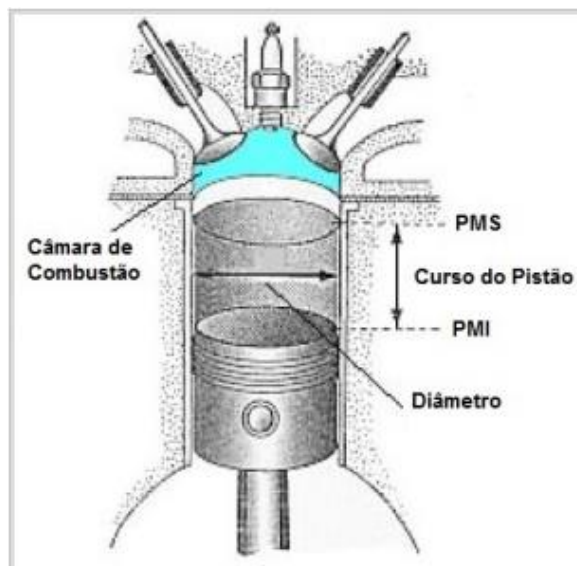


Figura 2.32 | Esquema Cilindro (PMS, PMI e curso). [43]

O motor pode funcionar com vários combustíveis, sendo que os mais usados na indústria automóvel são a gasolina, gasóleo (diesel), gás (gás natural ou GPL) e o biodiesel. [41]

O motor de combustão interna mais usual é o motor a gasolina, denominado de motor de ignição comandada ou ignição por faísca, derivado à sua combustão iniciar-se por meio de uma descarga elétrica (de tensão elevada) dentro da câmara de combustão. Um outro motor de combustão interna é o motor a gasóleo, denominado de motor de ignição por compressão, este não possui um sistema de ignição, a combustão é resultado do aumento da pressão, que provoca um aumento da temperatura, o suficiente para garantir a inflamação do gasóleo à medida que é injetado no seio do ar. [41]

Os motores de ignição comandada funcionam de modo semelhante ao ciclo ideal *Otto* (ciclo a volume constante), por sua vez os motores de ignição por compressão funcionam de forma semelhante ao ciclo ideal *Diesel* (ciclo a pressão constante). a principal diferença entre estes ciclos ideais reside no fornecimento de calor, esta no ciclo *Diesel* ocorre a pressão constante. Existem ainda outros ciclos, como o ciclo *Miller* ou *Atkinson*. [41]

O ciclo de *Atkinson* (ciclo teórico a volume constante e expansão total) foi inventado por *James Atkinson* em 1882, este ciclo dá prioridade à eficiência em detrimento da potência. É utilizado em alguns veículos híbridos e elétricos tais como o *Toyota Prius*, *Ford Fusion Hybrid*, *Mercedes S400 Blue Hybrid*, entre muitos outros.

Os motores de combustão a pistão podem também ser classificados quanto ao número de tempos motor que apresentam. Assim podemos ter:

- Motores a dois tempos;
- Motores a quatro tempos.

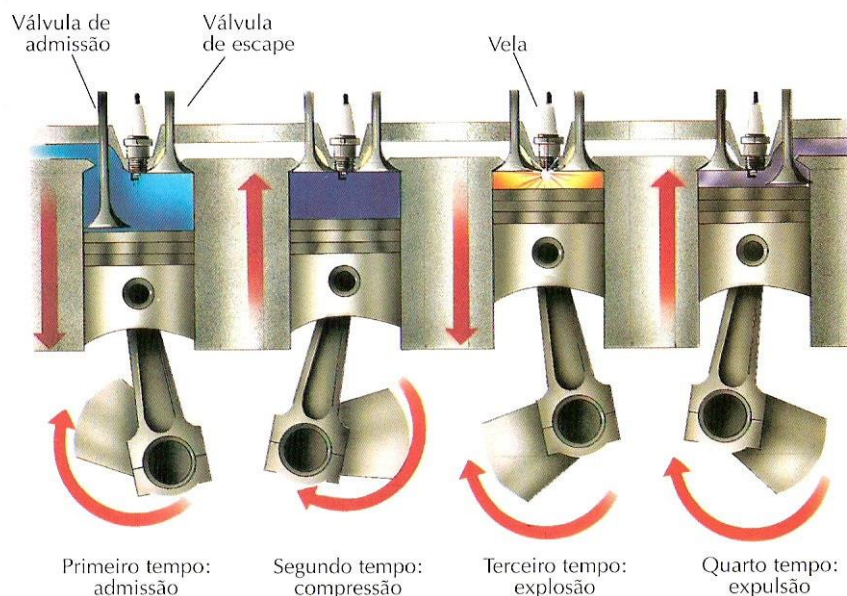


Figura 2.33 | Os 4 tempos do motor de combustão interna a gasolina. [44]

Os veículos híbridos, na quase sua totalidade, utilizam motores a quatro tempos a gasolina ou *diesel*. Estes motores dizem-se a quatro tempos pois o seu ciclo de operação apresenta quatro estágios distintos como se pode ver na Figura 2.33:

- **Admissão:** quando o pistão efetua o percurso descendente, estando a válvula de admissão aberta. A descida do pistão provoca uma depressão no interior do cilindro, e induz a mistura ar-combustível para dentro do mesmo. Assim se dá o enchimento do cilindro, com o pistão a movimentar-se desde o seu *PMS* até ao seu *PMI*;
- **Compressão:** ocorre quando **com** as válvulas de admissão e escape fechadas, o pistão sobe do *PMI* até ao *PMS*, comprimindo os gases que foram admitidos durante a admissão. A compressão irá provocar um aumento da pressão e consequentemente da temperatura, vaporizando parte da gasolina (ainda no estado líquido) e homogeneizando a mistura. Este estágio permitirá que a combustão seja mais completa, libertando mais calor e reduzindo a quantidade de produtos não queimados (altamente poluentes).
- **Explosão (expansão):** No momento em que o pistão termina o seu movimento ascendente no curso da compressão (*PMS*), uma faísca elétrica de elevada tensão é libertada entre os eletrodos da vela, na câmara de combustão. A mistura, pré-aquecida durante a compressão, queima rapidamente. A pressão obtida é muito elevada, provocando o movimento descendente do pistão violentamente até ao *PMI*. Esta descida é a responsável pelo movimento do veio motor (cambota), sendo designado por tempo motor, pois é o único estágio em que o motor fornece trabalho.
- **Expulsão (escape):** com a válvula de escape aberta após o final do tempo motor (em *PMI*), os gases queimados escapam por ela a grande velocidade. O

movimento ascendente do pistão, vai permitir a limpeza do cilindro dos gases queimados, sendo a válvula de escape fechada quando o pistão atingir novamente o seu PMS. Os gases após percorrerem o escape, são descarregados na atmosfera.

O ciclo é o conjunto dos quatro estágios: admissão, compressão, expansão e expulsão. Este ciclo repete-se continuamente durante o funcionamento do motor de combustão interna. No caso dos motores de ignição por compressão não existe um sistema de preparação da mistura exterior nem sistema de ignição, a combustão é resultado do aumento da pressão, que provoca um aumento da temperatura, o suficiente para garantir a inflamação do gás-óleo à medida que é injetado no seio do ar. [41]

Os veículos híbridos elétricos têm sido desenvolvidos de forma a combinar os benefícios dos motores de combustão interna e dos motores elétricos. Assim os motores elétricos são usados para compensar algumas deficiências que os MCI possuem, permitindo que estes apenas sejam utilizados no regime ótimo de funcionamento, permitindo maior eficiência e redução de emissões poluentes. Por sua vez, os MCI permitem uma maior autonomia ao veículo híbrido elétrico, pois para além de poder ajudar na propulsão do veículo, pode carregar as baterias fornecendo energia a um gerador de energia. Desta forma, está aberto o caminho à utilização de MCI de dimensões mais reduzidas, quando comparados com os veículos convencionais. [9]

Exemplos de motores utilizados em veículos híbridos elétricos:

*Tabela 2.5 | Motor de combustão interna utilizados em alguns veículos híbridos. [45]*

Modelo do veículo	Motor de combustão interna
1997 a 2009 - <i>Toyota Prius</i> (XW10, XW20)	4 Cilindros em linha, 1497cc, ciclo Atkinson
Desde 2009 - <i>Toyota Prius</i> (XW30)	4 Cilindros em linha, 1797cc, ciclo Atkinson
2000 a 2006 - <i>Honda Insight</i> (ZE1)	3 Cilindros em linha, 995cc, gasolina
2010 - <i>Chevrolet Volt</i>	4 Cilindros em linha, 1398cc, gasolina

## 2.8.2 Motores Elétricos

Nos veículos híbridos elétricos os motores elétricos podem ter duas funções, consoante as configurações adotadas para o veículo. O motor elétrico pode ser utilizado para converter energia elétrica em energia mecânica para ser utilizada na propulsão do veículo, como pode transformar energia mecânica em energia elétrica (funcionando como gerador) para alimentar o sistema de armazenamento de energia. [1]

A escolha dos motores elétricos para serem utilizados nos sistemas de propulsão híbridos tem-se revelado ao longo dos anos um verdadeiro desafio, não sendo de estranhar a contínua procura dos construtores de automóveis, do mais apropriado sistema de propulsão elétrica para os veículos híbridos. Os construtores têm procurado fundamentalmente três características chave: eficiência, confiança e custo. [46]

Esta tarefa de escolher o sistema de propulsão híbrido mais adequado é difícil, pois depende de outros fatores que nem sempre são fáceis de conciliar: expectativa do condutor, restrições impostas pelo veículo (dimensões, peso, área frontal, entre outros) e a fonte de energia. [46]

Do ponto de vista da indústria, os quatro tipos de motores elétricos, adotados ou que correm sério risco de o serem, para serem usados nos veículos híbridos elétricos são:

- Motor elétrico DC
- Motor elétrico de indução
- Motor elétrico de ímanes permanentes
- Motor elétrico de relutância variável

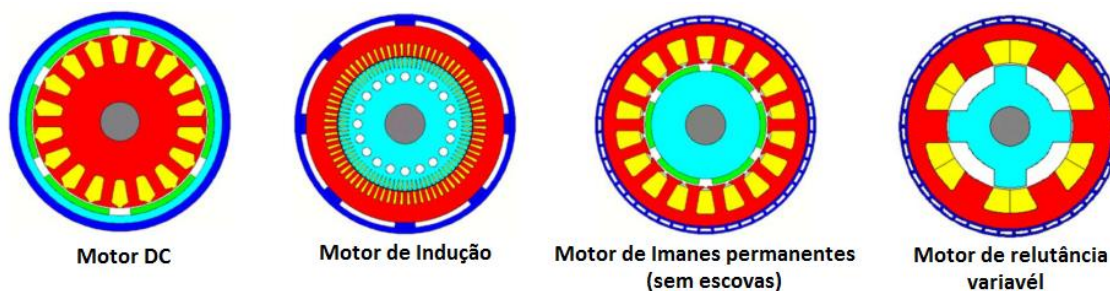


Figura 2.34 | Secções transversais dos motores. [46]

A análise de diversos artigos relacionados com o estado de arte dos sistemas de propulsão elétricos, permitiu-me observar que o motor elétrico de indução e o de ímanes permanentes são atualmente os mais utilizados, os de relutância variável começam a ganhar bastante interesse e em sentido descendente de interesse aparecem os motores DC. [46]

Segundo o estudo efetuado por Zeraoulia, Benbouzid e Diallo, as principais exigências do sistema de propulsão dos veículos híbridos elétricos são:

- Potência instantânea elevada, assim como uma alta densidade de potência;
- Um elevado binário a baixa velocidade para o arranque e em subida, assim como uma alta potência a uma velocidade elevada constante;
- Uma gama de velocidade muito ampla nas regiões de binário e potência constantes;
- Uma resposta rápida de binário;
- Eficiência elevada acima das gamas de velocidade e binário;
- Eficiência elevada no modo de travagem regenerativa;
- Alta fiabilidade e robustez para várias condições de funcionamento;
- Custo razoável.

A Figura 2.35 ilustra o gráfico característico de um motor elétrico comum, usado em veículos híbridos elétricos.

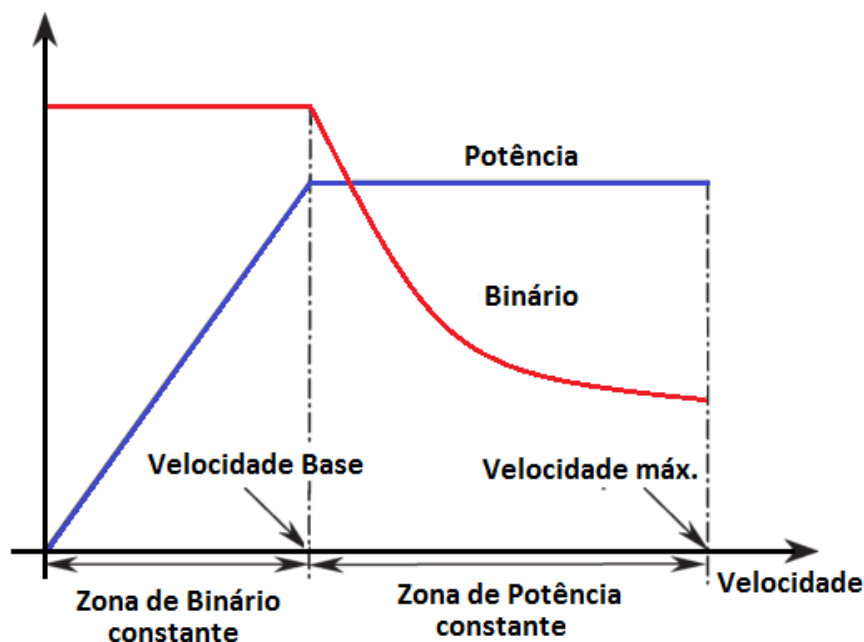


Figura 2.35 | Gráfico característico de um motor elétrico usado em HEVs. [46]

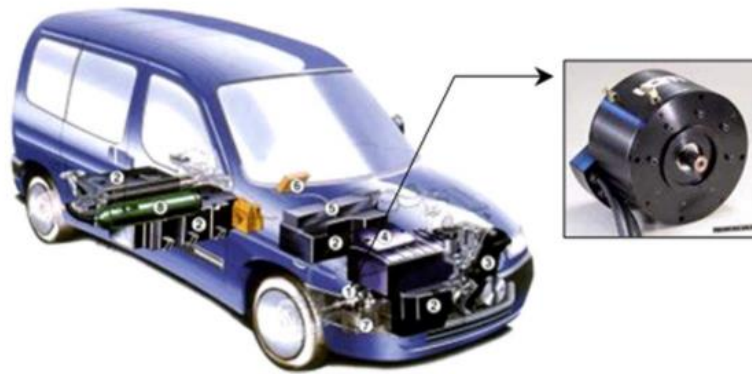
Na zona de binário constante, o motor elétrico produz um binário constante (binário nominal) em toda a gama da velocidade, até a velocidade nominal ser alcançada. Uma vez alcançada e ultrapassada a velocidade nominal do motor elétrico, o binário diminui proporcionalmente com a velocidade, resultando numa potência constante à saída. A zona de potência constante pode diminuir com velocidades mais elevadas, nas quais o binário irá diminuir proporcionalmente com o quadrado da velocidade. [46]

### 2.8.2.1 Motor elétrico DC

Os motores elétricos *DC*, Figura 2.36 tiveram destaque na propulsão elétrica devido sobretudo às características binário/velocidade que respondiam bem às exigências da tração, bem como devido ao facto do seu controlo de velocidade ser relativamente simples e de fácil implementação. [46]

O motor *DC* é constituído por um estator com ímanes permanentes e um rotor/eixo que consiste em escovas, bobinas/armadura e um comutador. Quando a bobina é alimentada, a corrente que passa através da bobina produz um campo magnético em torno da armadura, e os ímanes do estator atraem ou repelem o rotor magnetizado criando assim um binário de rotação. No momento em que ocorre o alinhamento do rotor com o ímã permanente, o comutador (escovas) inverte o sentido da corrente na bobina fazendo com que esta seja repelida pelo estator. [36]





*Figura 2.36 | Motor DC aplicado na Citroën Berlingo Híbrida. [46]*

Contudo, os motores *DC* apresentavam um atravancamento elevado, uma baixa eficiência, baixa fiabilidade e ainda uma elevada necessidade de manutenção devido à presença de um comutador mecânico (escovas). [46]

#### **Exemplos de aplicação:**



*Figura 2.37 | Citroën Berlingo Hybrid. [47]*

#### **2.8.2.2 Motor elétrico de indução**

O motor de indução é largamente aceite como o motor com mais potencial para assumir a propulsão de um veículo híbrido elétrico, devido à sua fiabilidade, robustez, baixa manutenção e capacidade de operar em ambientes considerados hostis. [46]



Figura 2.38 | Motor elétrico de indução: Renault Kangoo. [48]

O motor de indução é constituído basicamente por dois componentes principais, um estator e um rotor. O estator é, por norma, formado por três bobinas ou pares de polos bobinados. O rotor é geralmente composto por barras de alumínio ou cobre em curto-circuito nas extremidades criando uma estrutura em forma de gaiola. As três bobinas, ou enrolamentos, estão dispostas de forma que uma corrente positiva produza um campo magnético em cada bobina com  $120^\circ$  de defasamento. Sendo estas bobinas alimentadas por uma corrente alternada trifásica, o campo magnético resultante gira proporcionalmente à frequência da corrente, o que induz um campo eletromagnético contrário ao movimento do estator no rotor, o que leva, então, o rotor a seguir a rotação do campo magnético do estator. [36]

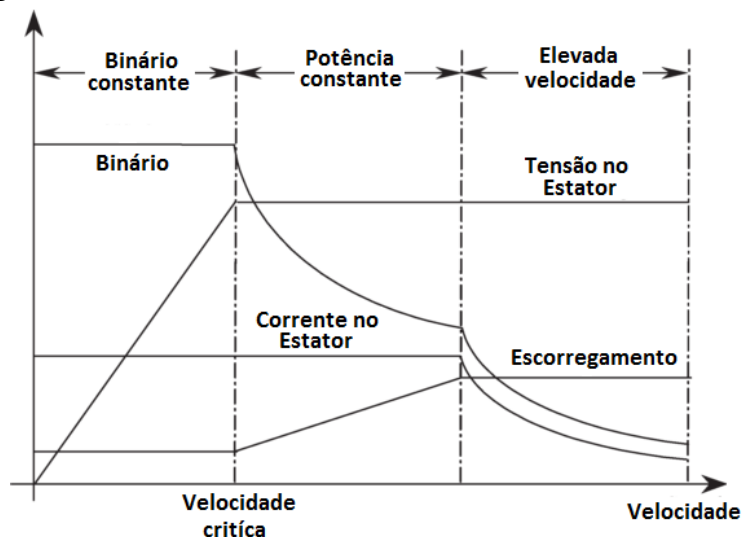


Figura 2.39 | Gráfico característico do motor elétrico de indução. [46]

Contudo devido à presença de uma quebra de binário, a sua operação está limitada a uma zona de potência constante. O binário máximo é atingido à velocidade crítica. Estas características são visíveis na Figura 2.39.

No entanto existem alguns fatores que foram limitando a utilização deste tipo de motores em veículos híbridos elétricos como o elevado valor de perdas, baixa eficiência, baixo fator de potência.[46]



Com o objetivo de atacar o problema da quebra de binário, tenta-se aumentar a região de potência constante, sem ser necessário sobre dimensionar o motor, esta tentativa toma forma sob a utilização de um motor multifásico com mudança de polo, ver a Figura 2.40. Uma outra solução passa pelo uso de inversores duplos. [36]

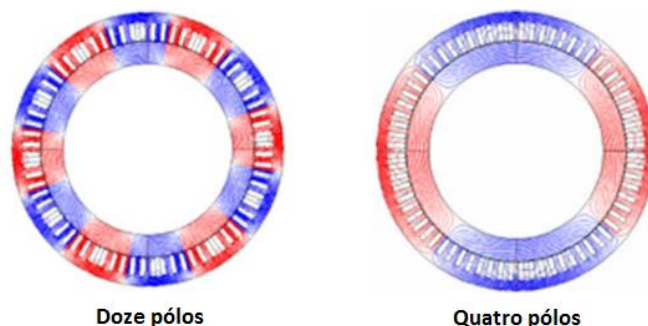


Figura 2.40 | Motor elétrico de indução com mudança de polo. [36]

#### Exemplos de aplicação:



Figura 2.41 | Renault Kangoo Hybrid. [49]



Figura 2.42 | BMW X5 Hybrid. [50]

#### 2.8.2.3 Motor elétrico de ímanes permanentes (motor síncrono)

O motor elétrico de ímanes permanentes é um dos motores mais adotados pelos fabricantes de veículos híbridos e aquele que pode competir seriamente com os motores elétricos de indução. Esta situação deve-se às suas principais características como a elevada densidade de potência obtida com motores com peso e volume reduzido quando comparado com o motor de indução, a sua grande eficiência e a eficiente dissipação do calor para o ambiente circundante.

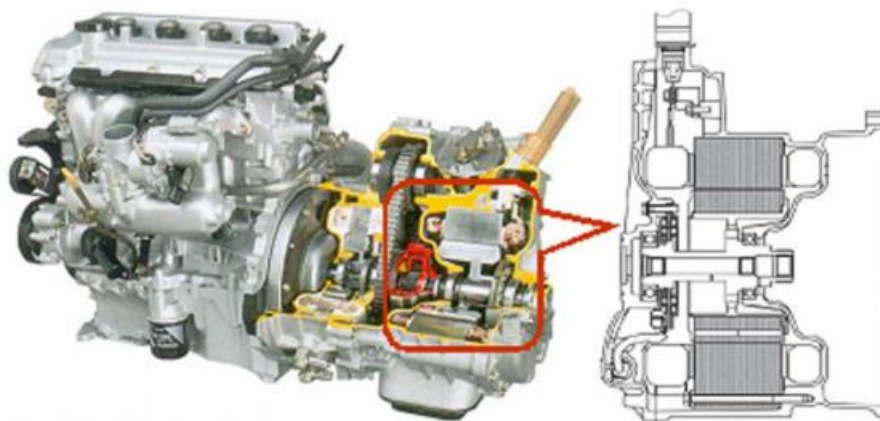


Figura 2.43 | Motor elétrico de ímanes permanentes: Toyota Prius. [46]

Este tipo de motor usa corrente alternada, no entanto esta corrente deve ser de frequência variável e, por conseguinte, é derivada a partir de uma alimentação em corrente contínua. Para um motor de corrente contínua (*DC*) sem escovas, o rotor é constituído por um íman permanente e o estator contém as bobinas, não há escovas ou comutadores. A corrente ao passar pela bobina gera um campo magnético que atrai ou repele o rotor provocando um binário de rotação do rotor. Ao contrário dos motores elétricos *DC*, os motores de ímanes permanentes possuem um campo magnético constante. A comutação da corrente tem de ser sincronizada com a posição do rotor, isto é geralmente feito por meio de sensores ligados a um inversor que controlam a frequência *AC*. [36]

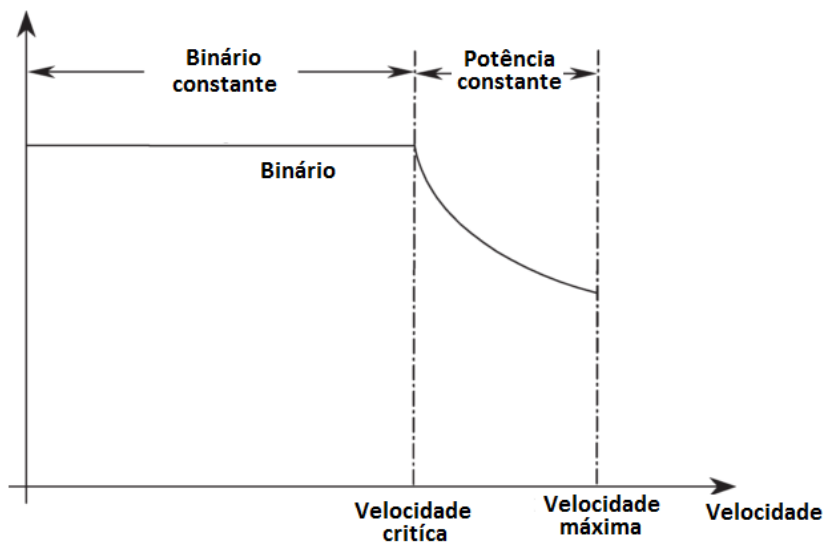


Figura 2.44 | Gráfico característico do motor de ímanes permanentes. [46]

Estes motores apresentam por natureza uma região de potência constante relativamente curta, como pode ser observado na Figura 2.44, devido à presença de um campo magnético permanente que limita a sua gama de velocidades. De modo a aumentar a gama de velocidades e melhorar a eficiência, o ângulo de condução do conversor pode ser controlado acima da velocidade crítica, ver Figura 2.45. A gama de velocidades pode ser aumentada entre três a quatro vezes a velocidade base. Existem várias configurações para este tipo de motores. Elas, basicamente, dependem do

posicionamento dos imanes, e podem ser classificados como de montagem à superfície ou encrustados. [36]

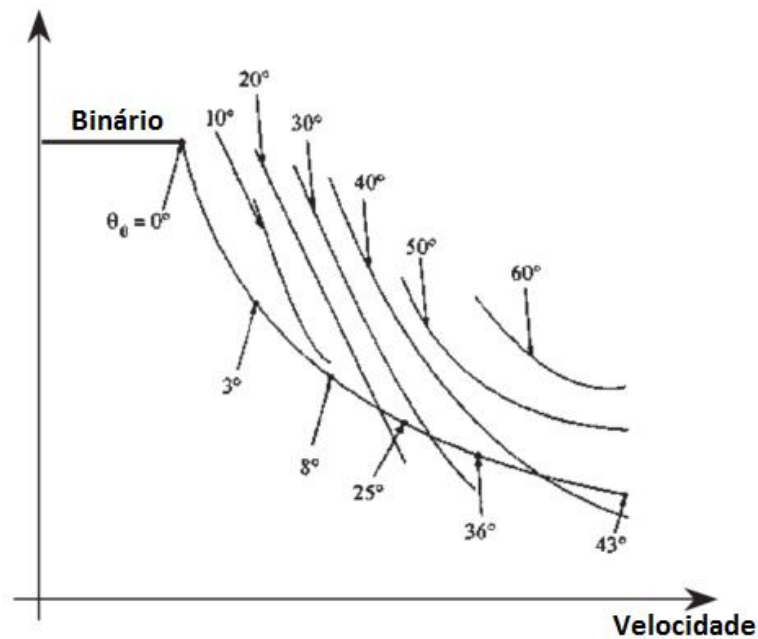


Figura 2.45 | Controle do ângulo de condução. [46]

Exemplos de aplicação:



Figura 2.46 | Toyota Prius Hybrid. [51]



Figura 2.47 | Honda Insight Hybrid. [52]

#### 2.8.2.4 Motor de relutância variável (SRM - Switched Reluctance Motor)

Estes motores têm algumas vantagens incontestáveis, tais como uma construção mais simples e robusta, operação tolerante a falhas, controle mais simplificado e uma relação binário/velocidade invulgar. [46]



Figura 2.48 | Conjunto motor combustão interna, motor elétrico de relutância variável e caixa de velocidades do Holden ECommodore. [53]

O funcionamento do motor de relutância variável é extremamente simples. O estator e o rotor de ferro são magnetizados por uma corrente que passa através de uma bobina presente no estator. Sempre que o rotor não estiver alinhado com o campo magnético do estator, um binário de rotação será produzido para o rotor rodar e minimizar o espaço de ar (relutância) entre os dois, permitindo que o campo magnético seja simétrico. No momento em que o rotor está alinhado com o estator, a corrente é desligada e o rotor move-se até uma posição em que a corrente possa, de novo, ser aplicada. [36]

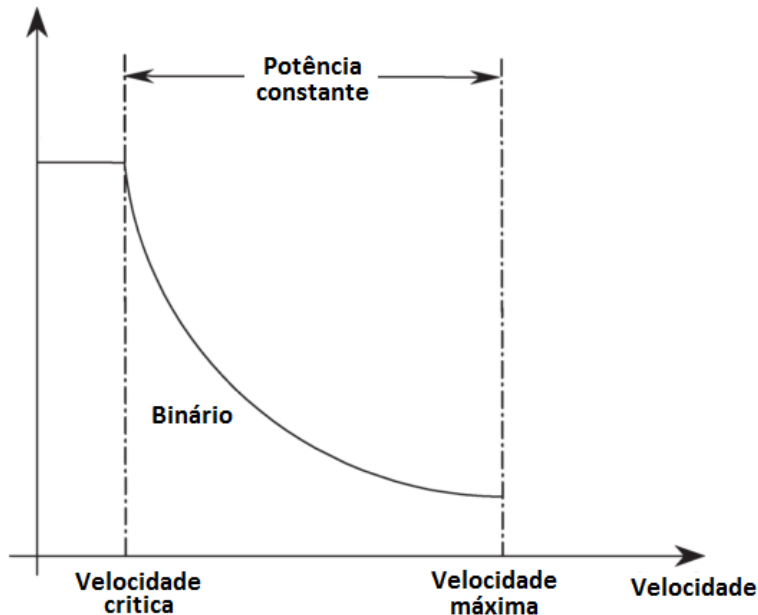


Figura 2.49 | Gráfico característico do motor de relutância variável (SRM). [46]

Estes motores podem inerentemente operar numa faixa de potência constante extremamente longa. Contudo, apresentam, algumas desvantagens como o seu ruído acústico, binário oscilante (ondulação do binário motor) e interferência eletromagnética. [46]

### Exemplos de aplicação:

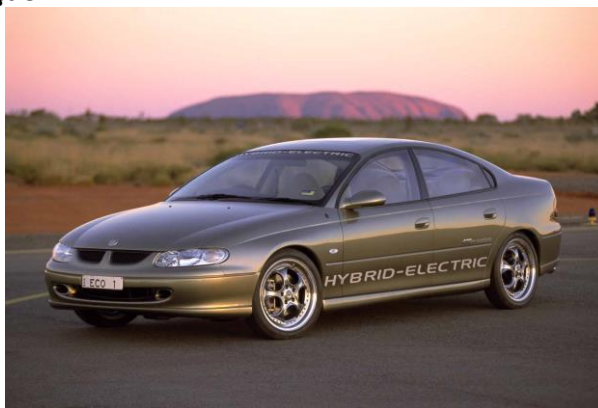
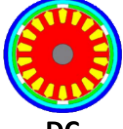

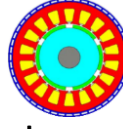
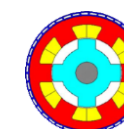






Figura 2.50 | Holden ECommodore Hybrid. [53]

#### 2.8.2.5 Comparação entre os diferentes motores elétricos

Os motores elétricos de indução (*IM - induction motors*) aparentam ser os candidatos mais adaptados para a propulsão dos veículos híbridos urbanos. A Tabela 2.6, que será apresentada, é baseada nas principais características dos veículos híbridos com propulsão elétrica, cada uma delas graduadas de 1 a 5 pontos, sendo que 5 pontos será a pontuação máxima. No estudo foi atribuído o mesmo peso a todas as características de forma a abranger uma vasta gama de HEVs. Contudo, é necessário ter em conta que o peso de cada uma destas características depende da sua aplicação, como por exemplo, na escolha do motor elétrico são tidos em conta basicamente três fatores: peso, eficiência e custo. Já no caso por exemplo de um veículo de combate em que os fatores de fiabilidade e maturidade tecnológica são muito mais importantes do que a eficiência. [46]

Tabela 2.6 | Avaliação dos sistemas de propulsão elétrica. [46]

	Tipos de Motor	 DC	 Indução	 Imanes Permanentes	 SRM
		DC	Indução	Imanes Permanentes	SRM
Características	Densidade de Potência	2.5	3.5	5	3.5
	Eficiência	2.5	3.5	5	3.5
	Controlo	5	5	4	3
	Fiabilidade	3	5	4	5
	Maturidade Tecnológica	5	5	4	4
	Custo	4	5	3	4
	Σ Total	 22	 27	 25	 23

### 2.8.3 Sistema de Armazenamento de Energia

A eficiência e autonomia totalmente elétrica dos veículos híbridos elétricos dependem da capacidade do seu sistema de armazenamento de energia. Este é utilizado para armazenar grandes quantidades de energia, mas também deve possuir a capacidade de fornecer rapidamente, em função do que o sistema de tração exigir. As características mais importantes dos sistemas de armazenamento de energia utilizados neste tipo de veículos incluem a densidade de energia, densidade de potência, eficiência, ciclo de vida, custo e manutenção. Atualmente, as baterias e os supercondensadores são as soluções mais adotadas para os sistemas de armazenamento de energia. As baterias possuem elevadas densidades de energia e armazenam a maior parte da energia a bordo dos veículos elétricos. Os supercondensadores, por sua vez, possuem elevadas densidades de potência e garantem um longo ciclo de vida com elevada eficiência e rápida resposta para carregar/descarregar. No presente, nenhum simples sistema de armazenamento de energia consegue responder aos requisitos dos veículos híbridos elétricos e veículos elétricos. [54]

#### 2.8.3.1 Baterias para HEVs, EVs e PHEVs

As baterias são, até ao presente, o sistema de armazenamento de energia predominante nos veículos elétricos, devido às suas características em termos de elevada densidade de energia, fiabilidade, robustez, portabilidade e baixo custo. [54]

As baterias eletroquímicas, mas vulgarmente designadas por "baterias", são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia potencial química durante o período de carregamento, e convertem a energia química em energia elétrica durante o período de descarregamento. [3]

Estas consistem tipicamente numa solução eletrolítica, dois elétrodos (um positivo e um negativo) e um separador (material eletricamente isolante e poroso). Os dois elétrodos são feitos de materiais diferentes, os quais reagem quimicamente com o eletrólito, através de uma solução iônica, ver Figura 2.51.



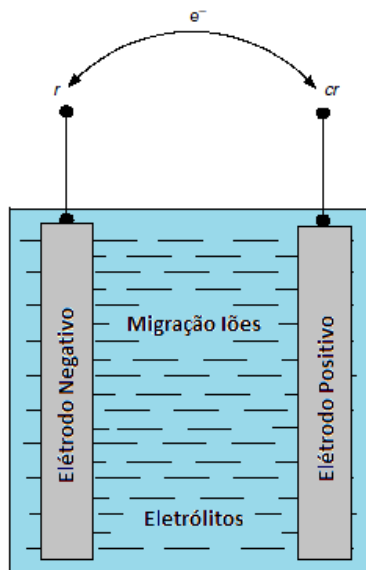


Figura 2.51 | Funcionamento de uma bateria. [55]

As características mais importantes das baterias com aplicação nos veículos automóveis são o ciclo de vida, potência específica, energia específica, custo e segurança da tecnologia. [29]

As baterias são especificadas pelo fabricante através da sua capacidade coulométrica (amperes x hora), sendo definido como o valor em ampere x hora obtido na descarga, a partir de um estado de carga completa até que a tensão nos seus terminais decresça até à sua tensão de corte. Na Figura 2.52 está um desses casos típico.

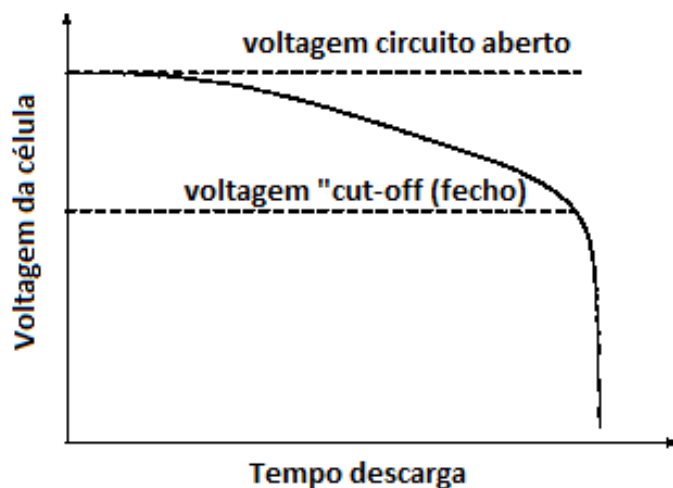


Figura 2.52 | Voltagem "Cut-off" de uma bateria. [3]

É importante lembrar que uma mesma bateria apresenta valores de capacidade diferentes para taxas de descarga diferentes, normalmente a capacidade de uma bateria decresce com o aumento da taxa de descarga. Os fabricantes de baterias especificam as baterias em função da sua capacidade em Ah juntamente com a taxa de corrente. Por exemplo, para uma bateria com a designação de 100 Ah a uma taxa C5, teria uma capacidade de 100 amperes x hora a uma taxa de descarga de 5 horas (Corrente Descarga=100/5= 20A). [3]

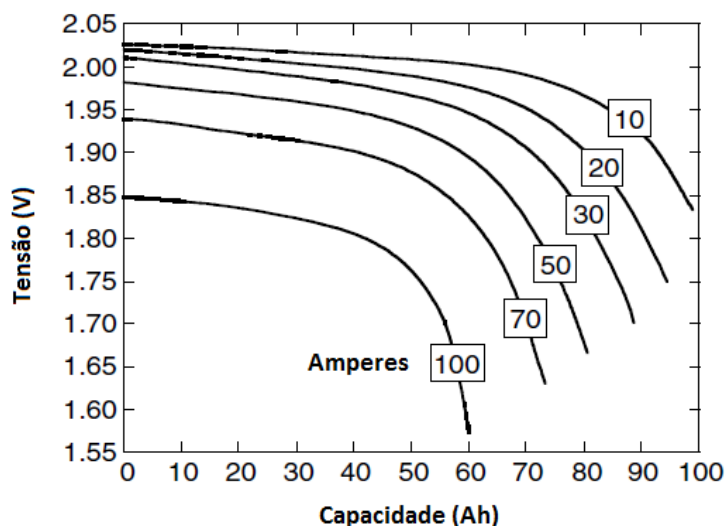


Figura 2.53 | Características de descarga de baterias de chumbo-ácido. [3]

Outro parâmetro importante da bateria é o estado de carga (SOC - *State-of-charge*). Este é definido como o rácio entre a capacidade num dado momento e o estado de carga completa, onde *100%* significa que a bateria está completamente carregada e *0%* significa que está completamente descarregada. [3]

As baterias viáveis para veículos elétricos (EVs) e veículos híbridos elétricos (HEVs) são atualmente: [54]

- Chumbo-ácido
- Hidreto metálico de níquel (Ni-MH)
- Níquel-cadmio (Ni-Cd)
- Iões de lítio
- Lítio-polímero

#### ❖ Baterias Chumbo-ácido

As baterias chumbo-ácido são compostas por um cátodo de óxido de chumbo, uma esponja de chumbo que funciona como ânodo e uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico. Durante a descarga ambos os materiais são transformados em sulfato de chumbo. [54]

Estas baterias possuem uma série de vantagens, tais como fiabilidade, robusta, tolerante aos abusos, tolerante à sobrecarga, vasta gama de tamanhos e capacidades disponíveis, muitos fornecedores por todo o mundo, impedância interna baixa e pode fornecer correntes muito altas. Porém, este tipo de baterias não é apropriado para grandes descargas superiores a 20% da sua capacidade nominal. Quando é sujeita a ciclos de descarga profundos, o seu ciclo de vida baixa consideravelmente. Ver Tabela 2.7, [54]



*Tabela 2.7 | Características das baterias Chumbo-ácido. [56]*

<b>Baterias chumbo-ácido</b>	
<b>Voltagem por célula [V]</b>	2.0
<b>Energia específica [Wh/kg]</b>	35
<b>Potência específica [W/kg]</b>	180
<b>Densidade de energia [Wh/l]</b>	100
<b>Eficiência [%]</b>	> 80
<b>Ciclo de vida [ciclos]</b>	1000
<b>Custo de produção [€/kW.h]</b>	45
<b>Taxa auto-descarga [por mês %]</b>	3 - 4

#### ❖ Baterias de hidreto metálico de níquel

As baterias de hidreto metálico de níquel usam uma solução alcalina como eletrólito. O eletrodo positivo (cátodo) da bateria Ni-MH é composto por hidróxido de níquel, sendo que o seu eletrodo negativo consiste numa liga de absorção de hidrogénio, como por exemplo, liga de vanádio, titânio, níquel e outros metais. Esta característica permite que este tipo de baterias possa possuir uma capacidade superior duas a três vezes comparativamente com as baterias de Ni-Cd. Os componentes da bateria Ni-MH são amigos do ambiente, e além disso, podem ser reciclados. As principais vantagens das baterias Ni-MH é que são seguras a trabalharem a altas tensões, longo ciclo de vida, gama de temperatura de utilização elevada, e resistência a sobrecarga e descarga. Contudo em casos de descarregamentos sucessivos, pode ver o seu ciclo de vida reduzido (200 - 300 ciclos). A sua melhor performance de operação é alcançada quando é descarregada entre 20 a 50% da sua capacidade nominal. Ver Tabela 2.8 [54]

*Tabela 2.8 | Características das baterias Ni-MH. [56]*

<b>Baterias Ni-MH</b>	
<b>Voltagem por célula [V]</b>	1.2
<b>Energia específica [Wh/kg]</b>	70 - 95
<b>Potência específica [W/kg]</b>	200 - 300
<b>Densidade de energia [Wh/l]</b>	180 - 220
<b>Eficiência [%]</b>	70
<b>Ciclo de vida [ciclos]</b>	<3000
<b>Custo de produção [€/kW.h]</b>	150 - 190
<b>Taxa auto-descarga [por mês %]</b>	20 - 30

### ❖ Baterias de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio contêm o pólo positivo e negativo no mesmo recipiente. O pólo positivo (cátodo) está coberto de hidróxido de níquel, e o seu pólo negativo (ânodo) coberto de metal de cádmio. Ambos os elétrodos encontram-se mergulhados numa solução alcalina de hidróxido de potássio, que permite a condução dos iões. Estas baterias possuem um longo tempo de vida e podem ser completamente descarregadas pois não sofrem qualquer dano. Contudo, e apesar de estas baterias poderem ser recicladas, o cádmio é um tipo de metal pesado inimigo do ambiente, que no caso de não ser corretamente tratado, torna-se numa ameaça ambiental. O custo deste tipo de baterias é uma das suas desvantagens. Ver Tabela 2.9. [54]

*Tabela 2.9 | Características das baterias Ni-Cd. [56]*

Baterias Ni-Cd	
Voltagem por célula [V]	1.2
Energia específica [Wh/kg]	50 - 80
Potência específica [W/kg]	200
Densidade de energia [Wh/l]	300
Eficiência [%]	75
Ciclo de vida [ciclos]	2000
Custo de produção [€/kW.h]	180 - 220
Taxa auto-descarga [por mês %]	10 - 20

### ❖ Baterias de Iões de Lítio

Os três componentes funcionais deste tipo de baterias são os dois elétrodos e a solução eletrolítica. Geralmente, o elétrodo negativo das baterias de iões de lítio são feitos de carbono, enquanto o elétrodo positivo é composto por um óxido de metal (cobalto). A solução eletrolítica é um sal de lítio dissolvido num solvente orgânico. Quando a bateria está a descarregar os iões de lítio fluem no pólo negativo para o pólo positivo, invertendo o sentido quando a bateria está a carregar. Este tipo de baterias apresenta uma alta densidade de energia, um bom desempenho a altas temperaturas e é reciclável. Como principais características, estas baterias apresentam um baixo efeito de memória, potência específica elevada, alta energia específica e um longo tempo de vida útil. Ver Tabela 2.10. [54]

*Tabela 2.10 | Características das baterias de íões de Lítio. [56]*

<b>Baterias íões de lítio</b>	
<b>Voltagem por célula [V]</b>	3.6
<b>Energia específica [Wh/kg]</b>	118 - 250
<b>Potência específica [W/kg]</b>	200 - 430
<b>Densidade de energia [Wh/l]</b>	200 - 400
<b>Eficiência [%]</b>	> 95
<b>Ciclo de vida [ciclos]</b>	2000
<b>Custo de produção [€/kW.h]</b>	110
<b>Taxa auto-descarga [por mês %]</b>	5 - 10

#### ❖ Baterias de Lítio-Polímero

As baterias de lítio-polímero são uma evolução das baterias de íões de lítio. Nestas baterias os eletrólitos de sais de lítio não são retidos por um solvente orgânico, existe por sua vez um material compósito de polímero sólido como o óxido de polietileno ou poliacrilonitrilo. [57]

Este tipo de baterias apresentam vantagens importantes como uma taxa muito baixa de auto-descarga (cerca de 5% ao mês), capacidade de fabrico numa grande variedade de formas e tamanhos, e design seguro (devido à reduzida atividade do lítio com o eletrólito sólido). Contudo, apresentam como desvantagem um desempenho relativamente fraco a baixa temperatura devido à dependência da temperatura da condutividade iônica. Ver Tabela 2.11. [3]

*Tabela 2.11 | Características das baterias de Lítio-Polímero. [56]*

<b>Baterias lítio-polímero</b>	
<b>Voltagem por célula [V]</b>	3.7
<b>Energia específica [Wh/kg]</b>	130 - 225
<b>Potência específica [W/kg]</b>	260 - 450
<b>Densidade de energia [Wh/l]</b>	200 - 250
<b>Eficiência [%]</b>	---
<b>Ciclo de vida [ciclos]</b>	> 1200
<b>Custo de produção [€/kW.h]</b>	110
<b>Taxa auto-descarga [por mês %]</b>	5

### 2.8.3.2 Comparação entre os diferentes tipos de baterias

Atualmente existem 5 tipos de baterias disponíveis no mercado que podem ser aplicados ao sistema de transporte rodoviário. A Tabela 2.12 apresenta todas as tecnologias e características dessas baterias. As baterias chumbo-ácido são as comuns atualmente pela sua utilização nos veículos convencionais. Destacam-se das demais pelo seu baixo custo de produção, e são uma boa solução quando o seu peso não é importante para o projeto. No entanto estas baterias não são amigas do ambiente, e causam problemas ambientais quer no seu fabrico quer no processo de eliminação. [56]

As baterias de níquel, por exemplo, as de níquel-cádmio (Ni-Cd) possuem um efeito de memória que não é adequado para usar em altas taxas de carga/descarga, como acontece nas aplicações automóveis, no entanto apresenta um bom desempenho em condições de trabalho rigorosos. Este tipo de baterias contém também materiais tóxicos e ainda um elevado custo de produção e de manutenção. [56]

As baterias de hidreto metálico de níquel (Ni-MH), por sua vez, são amigas do ambiente e podem ainda possuir duas a três vezes uma capacidade superior ao de uma bateria de Ni-Cd. No entanto, esta bateria tem uma taxa de auto-descarga cerca de 50% mais elevada quando comparada com as baterias de Ni-Cd. Outro dos inconvenientes passa pelo seu tempo de carregamento, que é superior às baterias de chumbo-ácido e às Ni-Cd, gerando uma enorme quantidade de calor durante o carregamento. [56] Consequentemente, a bateria Ni-MH requer algoritmo de carga mais complexo e carregadores mais dispendiosos. [56]

Tabela 2.12 | Comparação entre os diferentes tipos de baterias para EVs e HEVs.

Baterias	Características fundamentais das baterias					
	Energia Específica [Wh/kg]	Potência Específica [W/kg]	Densidade Energia [Wh/l]	Eficiência [%]	Ciclo de vida [ciclos]	Custo Produção [€/kW.h]
<b>Chumbo-ácido</b>	35	180	100	> 80	1000	45
<b>Ni-MH</b>	70 - 95	200 - 300	180 - 220	70	< 3000	150 - 190
<b>Ni-Cd</b>	50 - 80	200	300	75	2000	180 - 220
<b>Iões de lítio</b>	118 - 250	200 - 430	200 - 400	> 95	2000	110
<b>Lítio-polímero</b>	130 - 225	260 - 460	200 - 250	---	> 1200	110

As baterias de lítio são, na atualidade, os mais promissores dispositivos de armazenamento de energia devido às suas características. O seu baixo peso, elevada energia específica, potência específica e densidade de energia fazem com que sejam as mais evoluídas tecnologicamente quando comparadas com as baterias Chumbo-ácido, Hidreto metálico de Níquel e as de Níquel-Cádmio. Acrescentando ainda o facto não terem nenhum efeito de memória, bem como a ausência de metais tóxicos, como o chumbo, cádmio ou mercúrio, permitindo que sejam amigas do ambiente. [56]

De forma a reduzir o custo das baterias de íões de lítio, estão a ser usadas as baseadas em manganês ao invés das de níquel. [3]



Figura 2.54 | Pack de baterias Ni-MH. [58]



Figura 2.55 | Pack de baterias de íões de lítio. [59]

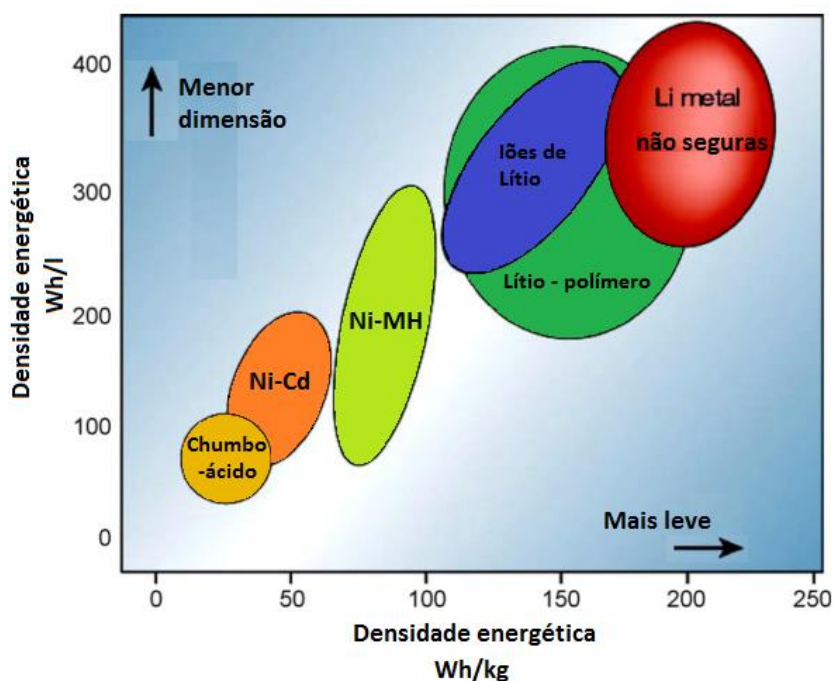


Figura 2.56 | Comparação dos diferentes tipos de baterias. [7]

### 2.8.3.3 Supercondensadores

Os supercondensadores armazenam energia através da separação física das cargas positivas e negativas. As cargas são armazenadas em duas placas paralelas e divididas por um isolante. Como não existem variações químicas sobre os elétrodos, os supercondensadores apresentam um longo ciclo de vida, mas uma baixa densidade energética. A Figura 2.57 apresenta a estrutura de uma célula individual de um supercondensador. [54]

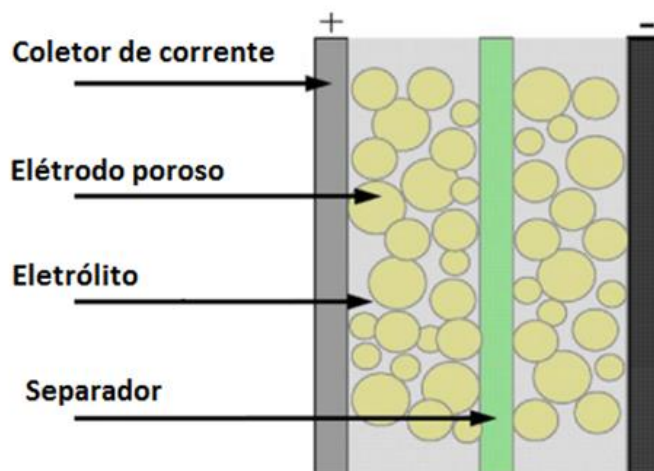


Figura 2.57 | Célula individual de um supercondensador. [54]

Os supercondensadores são caracterizados por possuírem uma potência específica consideravelmente mais elevada do que as das baterias, no entanto a sua energia específica é mais baixa. A sua energia específica atinge apenas alguns  $W.h/kg$ , mas a sua potência específica pode chegar aos  $3 kW/kg$ , valores que nenhum tipo de bateria consegue atingir. Devido à sua baixa energia específica e dependência da tensão do estado de carga (*SoC*), é difícil utilizar os supercondensadores como armazenamento de energia dos veículos híbridos elétricos. No entanto é possível tirar partido das características dos supercondensadores, utilizando-os como fonte de energia auxiliar beneficiando das vantagens que daí advêm. [3]

Os supercondensadores podem ser utilizados então como assistentes de armazenamento de energia nos HEVs. Em circuitos citadinos, existem muitos "stop-and-go" (por exemplo devido a semáforos, trânsito e acidentes) onde o total de potência requerida é relativamente baixa. Os supercondensadores são os mais apropriados para capturar energia proveniente da travagem regenerativa e rapidamente disponibilizar potência para a aceleração devido às suas características de rápidas cargas/descargas. [54]



Figura 2.58 | Pack de supercondensadores para aplicação num veículo híbrido. [60]

### 2.8.3.4 Sistema de armazenamento híbrido (bateria e supercondensador)

Uma aplicação promissora que pode ser utilizada colocando os supercondensadores como fonte de energia auxiliar é o chamado sistema de armazenamento de energia híbrido (bateria e supercondensador) para EVs e HEVs. Os requisitos de energia específica e potência específica podem ser desacoplados, o que permite a oportunidade de projetar as baterias, otimizando-as para a energia específica e para o ciclo de vida, dando pouco relevo à potência específica (será assegurada pelo supercondensador). Devido ao efeito de nivelamento da carga do supercondensador, a elevada corrente de descarga da bateria e a elevada corrente de carga para a bateria proveniente da travagem regenerativa é minimizada (absorvida pelo supercondensador), de maneira que a energia disponível, resistência e ciclo de vida da bateria possam ser significativamente aumentadas.

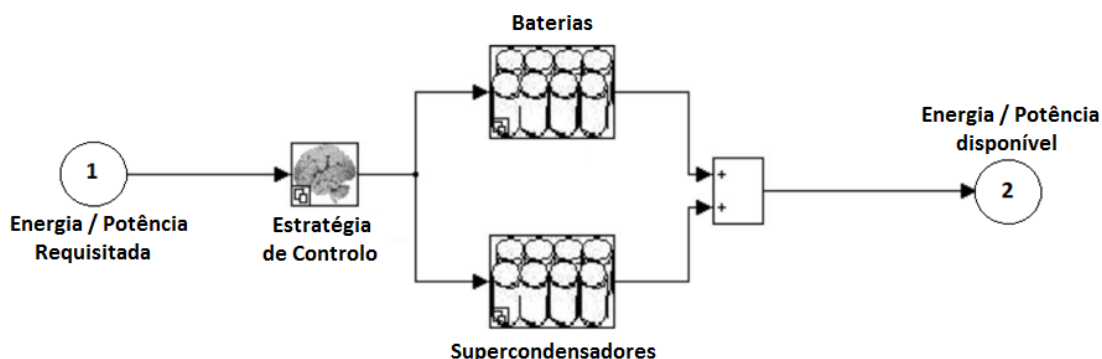


Figura 2.59 | Diagrama de blocos de um sistema de armazenamento de energia híbrido. [1]

Para Yimin Gao e Mehrdad Ehsani, a abordagem mais simples é ligar as baterias e os supercondensadores como mostra a Figura 2.60:

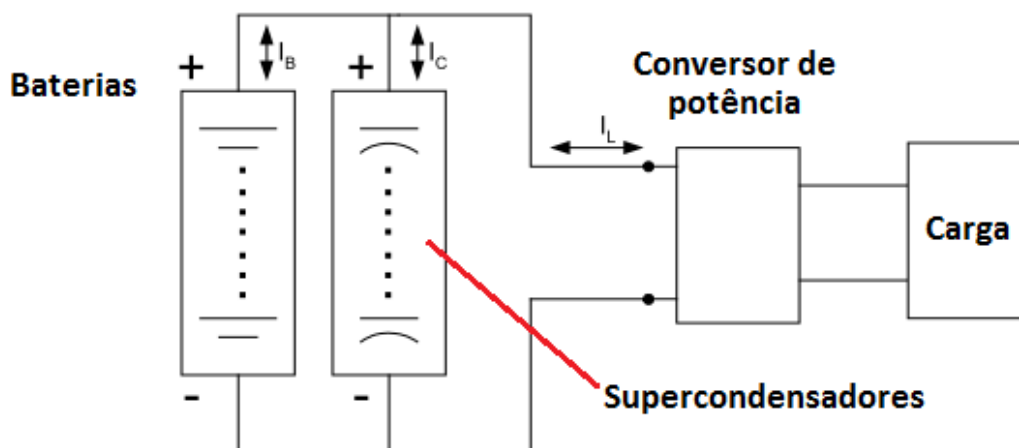


Figura 2.60 | Sistema híbrido de armazenamento de energia com baterias em paralelo com supercondensadores (conexão passiva). [9]

Esta configuração tem uma estrutura muito simples e não necessita de unidade de controlo. O comportamento dos supercondensadores é de um filtro de corrente, e sendo assim, os elevados picos de corrente da bateria são nivelados. O nivelamento da corrente da bateria por intermédio de supercondensadores pode proporcionar vários



benefícios às baterias, como por exemplo uma diminuição do tamanho do pack das baterias, elevadas eficiências, gestão térmica das baterias mais simples e um aumento do seu ciclo de vida. Inclusive, com a utilização dos supercondensadores, a variação da tensão será menor, permitindo desta forma a ausência de um conversor de potência. [9]

### **2.8.3.5 Controlo de tecnologia híbrida**

Grande parte dos desafios no desenvolvimento dos HEVs passam pela coordenação dos diversos componentes que deles fazem parte, como é o caso das fontes de energia e dos conversores. No caso de um veículo híbrido elétrico acresce também a necessidade de controlo do fluxo de potência, tanto para a mecânica como para a elétrica. Esta necessidade levou ao desenvolvimento de algumas estratégias de controlo de energia. [61]

O critério mais importante no projeto de um veículo híbrido elétrico é conseguir obter o máximo de eficiência do sistema de propulsão, controlando a conversão de energia eficazmente. Assim as estratégias de controlo procuram atingir e satisfazer determinados objetivos dos HEVs:

- Máxima economia de combustível;
- Redução de emissões poluentes;
- Redução de custos dos sistemas;
- Bom desempenho de condução.

De forma a ser possível atingir estes objetivos, as configurações de "*hardware*" e as estratégias de controlo dos sistemas de propulsão são projetadas em conjunto.

Os motores elétricos implementados nos HEVs são alimentados por baterias através de dispositivos eletrónicos. A bateria, quando descarregada, é carregada pelo motor de combustão interna ou através de travagem regenerativa. Por forma a aumentarmos o alcance do veículo híbrido, permitindo maior autonomia elétrica e desta forma uma maior economia de combustível, temos de projetar uma bateria de maior capacidade. Contudo, existe o compromisso de recarregar as baterias conforme foi esclarecido atrás. Uma das formas de garantir o carregamento das baterias para além de usar o MCI e a travagem regenerativa é usar a corrente elétrica comum, e assim convertemos o veículo num híbrido "*plug-in*". Na Figura 2.61 estão apresentados os modos de funcionamento de um veículo híbrido. [23]



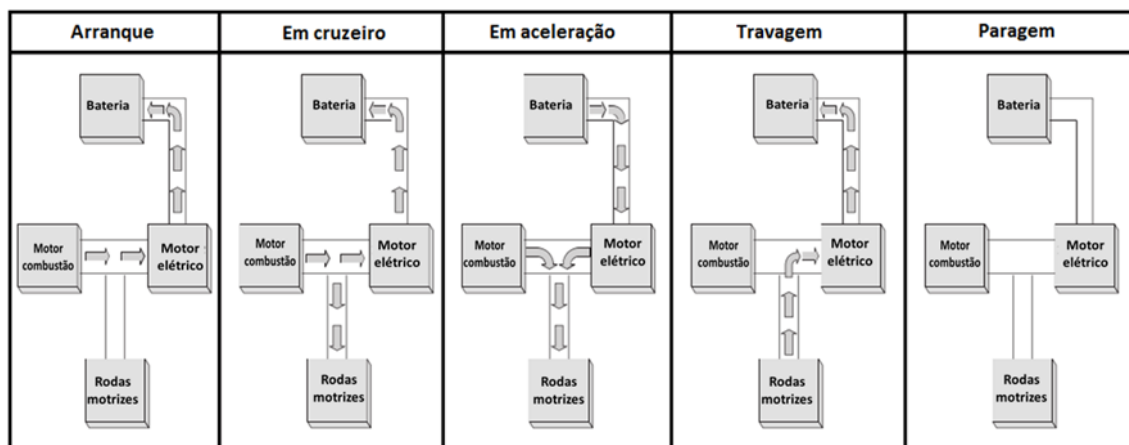


Figura 2.61 | Modos de funcionamento de um veículo híbrido elétrico. [23]

Atualmente, o algoritmo de controlo para os veículos híbridos é projetado com base em simulações e experiência. No entanto, como o controlo é a chave para o desenvolvimento da tecnologia dos HEVs, a investigação sobre outras formas de controlo são essenciais. Existem, basicamente, dois tópicos de controlo dos veículos híbridos elétricos: controlo de gestão de energia e controlo de condução do veículo.

O primeiro visa otimizar ao máximo a eficiência de energia e a redução das emissões poluentes. O segundo, a otimização da performance de condução, conforto e segurança. A Figura 2.62 apresenta o esquema de controlo de uma configuração de um híbrido paralelo, como o utilizado num *Honda Civic* e Figura 2.63 apresenta a estratégia de controlo e gestão de potência para um híbrido série-paralelo, como o utilizado no *Toyota Prius*. [1]

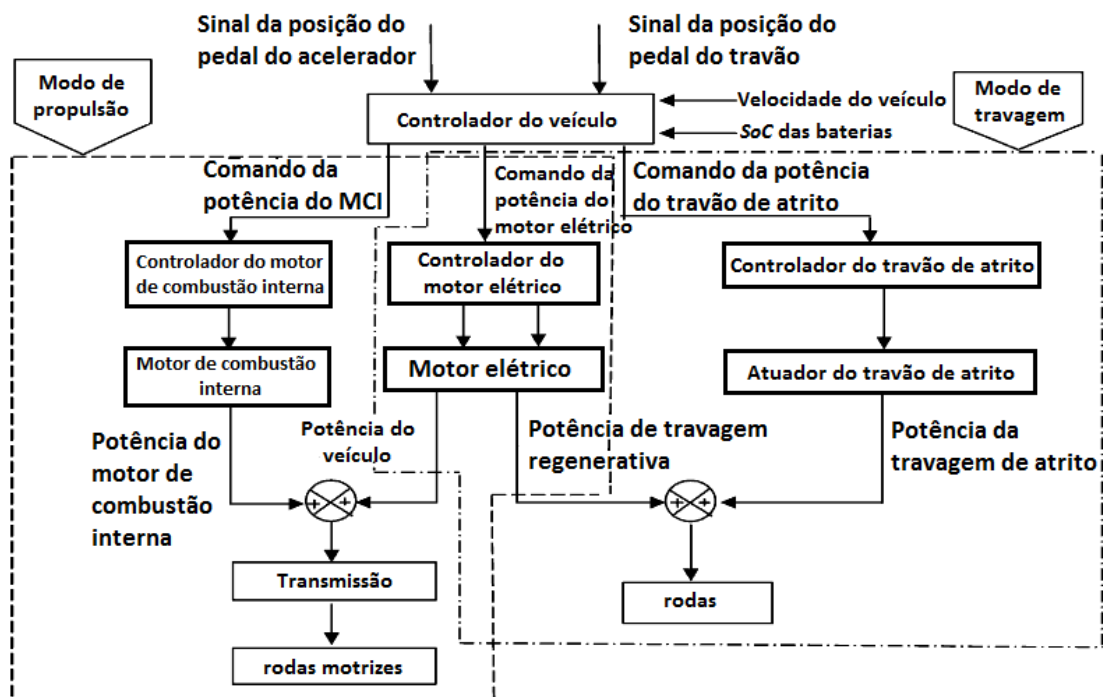


Figura 2.62 | Esquema de controlo de uma configuração paralelo - Honda Civic. [1]

Do ponto de vista da tecnologia de controlo, um sistema híbrido é um evento discreto e de dinâmica contínua. Assim, existem questões que devem ser abordadas, como o que é a especificação do desempenho, como determinar a lei do controlo, como determinar o comando do binário, como distribuir o binário para o motor elétrico e para o motor de combustão interna, respetivamente, qual a política adequada a seguir no que diz respeito à estratégia de controlo e qual é a relação entre controlo e desempenho do veículo. [1]

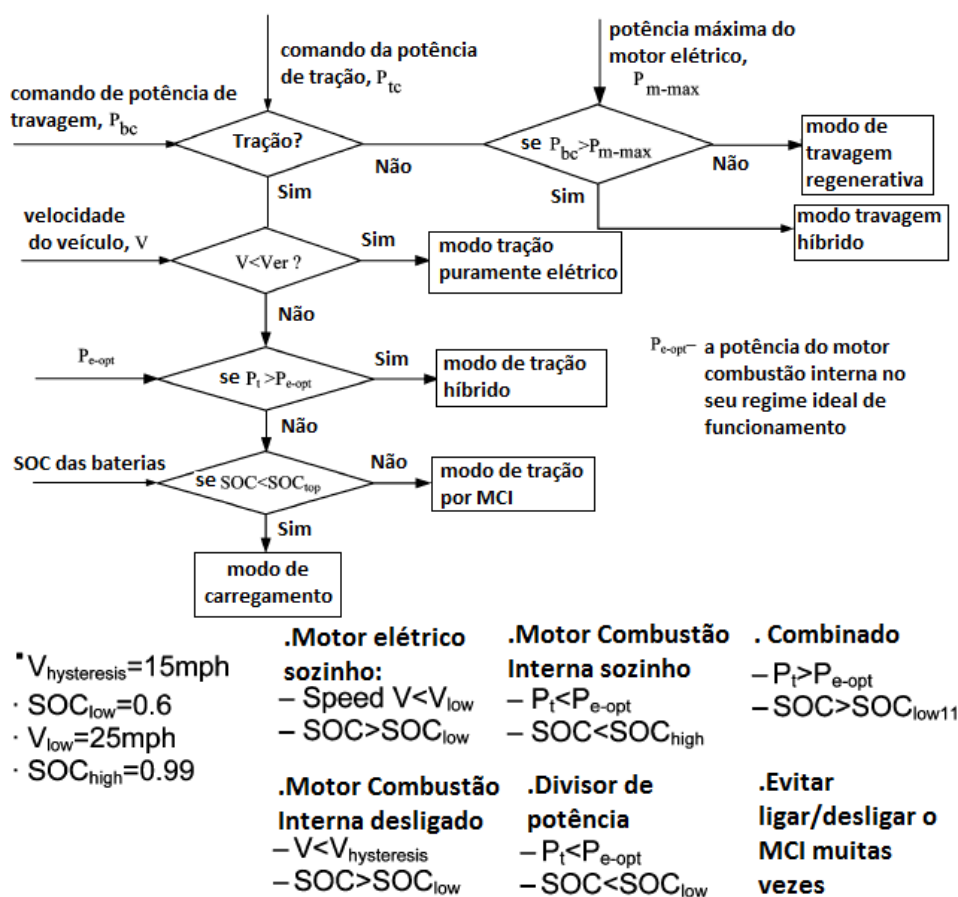


Figura 2.63 | Estratégia de controlo e gestão de potência de uma configuração série-paralelo, utilizado por exemplo no Toyota Prius. [1]

A Figura 2.64 mostra o modelo do estado estacionário de três componentes principais de um veículo híbrido elétrico, o do motor de combustão interna, do motor elétrico e da bateria. É importante assegurar que estes três componentes principais operam dentro da sua região ideal de funcionamento. Além disso, o modelo dinâmico destes três componentes principais, bem como de todo o sistema híbrido devem ser cuidadosamente estudados. [1]

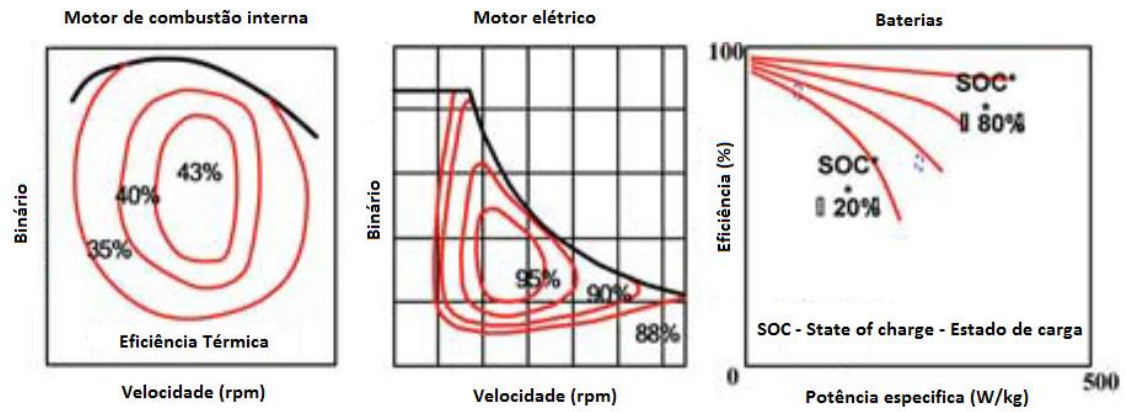


Figura 2.64 | Modelos do estado estacionário do motor de combustão interna, do motor elétrico e da bateria. [1]



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Seleção do veículo

Na fase inicial do trabalho foi necessário selecionar um veículo convencional existente no mercado, que serviria como plataforma base para o projeto.

Foram então analisados diversos veículos, com características diferentes, pois à luz do código da estrada, uns são considerados automóveis enquanto outros são considerados quadriciclos.

Nesta análise foram tomados em consideração diversos aspetos tais como, dimensões do veículo, categoria de circulação (possibilidade de circular em autoestrada), nível de consumo de combustível e performance.

De uma lista extensa de veículos, ficamos reduzidos a cinco, sendo que dois deles estão classificados, pela legislação portuguesa atual, como quadriciclos:

- Fiat Seicento;
- Toyota iQ;
- Smart ForTwo;
- Aixam 400 (quadriciclo);
- Ligier Ixo Urban C (quadriciclo).



*Figura 3.1 | Fiat Seicento. [62]*



*Figura 3.2 | Toyota iQ. [63]*



*Figura 3.3 | Smart ForTwo. [64]*



*Figura 3.4 | Aixam 400. [65]*



*Figura 3.5 | Ligier Ixo Urban C. [66]*

Os quadriciclos *Aixam 400* e o *Ligier Ixo Urban C* foram preteridos, devido a não poderem circular em autoestradas que é um dos requisitos impostos a este trabalho, os veículos devem estar autorizados a circular em percursos extraurbanos. A seleção fica agora

reduzida a três veículos, todos eles de *classe B* (segundo a legislação portuguesa). A opção do *Toyota iQ* foi colocada de parte, devido ao seu elevado custo de aquisição quando comparado com os outros dois veículos.

Restando apenas o *Smart ForTwo* e o *Fiat Seicento*, a escolha recaiu sobre o primeiro. Esta escolha é facilmente justificada com o facto de se pretender fazer uma análise dos consumos e performances dos veículos, sendo que o modelo *Smart* já existe nas versões a gasolina, *diesel* e elétrico, permitirá efetuar uma comparação entre todos.

Com o objetivo de reduzir o custo de aquisição do veículo, e de manter um orçamento reduzido para todo o projeto, a escolha recaiu sobre o *Smart ForTwo* da primeira geração. Ver Figura 3.6.



Figura 3.6 | *Smart ForTwo 1ª geração - veículo adquirido.*

Tabela 3.1 | *Características do veículo adquirido. [45]*

Características do veículo adquirido para elaboração do projeto	
Modelo	Smart & Pure
Combustível	Gasolina
Motorização	599 cm <sup>3</sup> / 3 cilindros / turbo
Potência Nominal	30kW/41HP a 5250RPM
Binário Nominal	70 Nm a 3000RPM
Emissão de CO <sub>2</sub>	90 g/km
Pneus	Dianteiro: 145/65 R15; Traseiro: 175/55 R15
Peso	795 kg
Dimensões (mm)	2500 (comp.) x 1515 (larg.) x 1549 (alt.)
Distância entre eixos	1812mm
Velocidade Máxima	135 km/h (limitada eletronicamente)
Cor	Vermelho
Preço	2500€

### 3.2 O Smart e a sua história

A origem do *Smart* remonta aos finais dos anos 90 quando *Nicolas Hayek*, CEO da *SMH*, empresa detentora da marca de relógios *Swatch*, idealizou desenvolver um micro automóvel que tivesse por base as mesmas estratégias de produção e personalização dos relógios. A empresa privada de *Hayek*, a *Hayek Engineering AG*, começou então a desenvolver um novo veículo com capacidade para 2 passageiros e com motor híbrido. [67]

*Hayek* sabendo que os principais fabricantes de automóveis podiam encarar o aparecimento do *Smart* como uma ameaça, procurou desde logo encontrar um parceiro de negócio que o ajudasse no desenvolvimento do projeto. Assim e após várias tentativas, em Julho de 1991, *Hayek* assinou um acordo de cooperação com a *Volkswagen*. Contudo este projeto não durou mais que dois anos e foi terminado com a entrada de *Ferdinand Piëch* para CEO da *Volkswagen*, que justificou esta decisão com o projeto já em curso do futuro *Lupo*. [66]



Figura 3.7 | Nicholas Hayek, criador do veículo Smart. [68]

*Nicholas Hayek* estabeleceu então novos contactos e após ter sido recusado pela *BMW*, *Fiat*, *General Motors* e *Renault*, conseguiu uma nova parceria, desta feita com a *Daimler-Benz AG*, e em conjunto formaram a *MCC (Micro Compact Car AG)* com sede na Suíça. [66]

Em 1995 foi criada uma fábrica para a produção do veículo *Smart* (acrónimo de *Swatch/Mercedes* e *Art*) em França, mais precisamente em Hambach. Tendo sido apresentado, em 1997, o primeiro veículo *Smart* no Salão Automóvel de Frankfurt, a sua comercialização aconteceu no ano seguinte em 9 países europeus (Bélgica, Alemanha, França, Itália, Luxemburgo, Áustria, Suíça, Espanha e Holanda). Devido ao pouco entusiasmo que o *Smart* conseguiu captar, a *Mercedes* de forma a manter a empresa viável (necessitou de ser recapitalizada) adquiriu a totalidade da empresa. Essa decisão viria a revelar-se acertada, pois no início do século XXI, o *Smart* tornou-se num dos principais ícones do mercado automóvel, de tal forma que chegou a ser produzido uma versão de quatro lugares (ver Figura 3.8) em 2003, que acabou por não se revelar tão popular e deixou de ser produzida em 2005. Desde 2007 até ao presente, a *Smart* tem vindo a ganhar terreno com a nova geração do veículo de dois lugares, o *Smart ForTwo*.



O Smart ForTwo teve até ao presente duas gerações, a primeira geração, cujo modelo é utilizado neste projeto (ver Figura 3.9), utilizou três motorizações distintas: duas a gasolina e uma a gasóleo (*diesel*). As cilindradas variavam entre os 599cc e 698cc para o *Smart* a gasolina e 799cc para o *Smart* a gasóleo. A segunda geração (ver Figura 3.10) passou a dotar o *Smart* a gasolina de motores com 999cc, sendo disponibilizadas versões com e sem turbo. [66]



Figura 3.8 | Smart ForFour. [69]



Figura 3.9 | ForTwo 1ª geração. [64]



Figura 3.10 | ForTwo 2ª geração. [64]

### 3.3 Soluções Construtivas para a hibridização do *Smart*

No seguimento de uma parceria entre o DEMEC (Departamento de Engenharia Mecânica) e o DEEC (Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) em que foram realizados dois projetos para a hibridização de um veículo, surgiu um novo projeto que tem por finalidade a implementação da tecnologia híbrida no *Smart ForTwo*.

Na fase inicial deste novo projeto, foram analisadas as considerações tomadas nos projetos anteriores, nomeadamente:

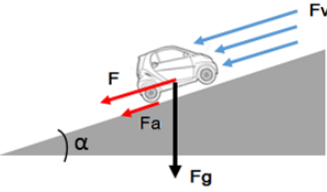
- Ligação mecânica entre o motor elétrico e rodas;
- Ligação mecânica entre o motor de combustão interna e o gerador elétrico;
- Equipamento de suporte para motor elétrico e para gerador;
- Atravancamento geral de todos os componentes e localizações;
- Dimensionamento do motor/gerador elétrico.

Na fase da análise ao dimensionamento do motor/gerador elétrico foi detetado a inexistência de uma folha de cálculo em que nos deveríamos basear para justificar a seleção do motor elétrico. Essa folha de cálculo deverá definir qual o binário de arranque que o motor elétrico deverá possuir, a partir de pressupostos assumidos para o veículo. No caso, o veículo estando parado, deveria ser capaz de vencer uma inclinação de 10%, a uma velocidade de 20 km/h.

A elaboração da folha de cálculo, ver Figura 3.11, em que foram considerados dados específicos do veículo (peso máximo de transporte, área frontal, pneus, entre outros), a relação de transmissão antes da caixa, a relação da caixa de velocidades (em função da velocidade escolhida), permitiu a determinação do binário de arranque que o motor elétrico necessita para satisfazer os requisitos do veículo.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		Dados:								
3		Massa (kg)	1000,00							
4		$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,81							
5		Crr	0,02							
6		Inclinação (%)	10%							
7		Área frontal (m <sup>2</sup> )	2,40							
8		Velocidade (Km/h)	20,00							
9		Velocidade (m/s)	5,56							
10										
11		Propriedades do ar:								
12		$F_v = \frac{(\rho \times C_d \times A_f \times v^2)}{2}$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1,204						
13			Cd	0,38						
14										
15		Razões de transferência								
16			Antes da caixa	1,000		Força (N)	976			
17			Na caixa	4,083		Força atrito (N)	195			
18						Resistência do ar (N)	0			
19						Ângulo (°)	5,71			
20		Roda:								
21		Diâmetro jante (polegadas)	15							
22		Pneu (%)	55%							
23		Pneu, largura (m)	0,175							
24		Raio (m)	0,287							
25		Perímetro (m)	1,802							

$$F = M \times g \times \sin \alpha$$

$$F_a = C_{rr} \times M \times g \times \cos \alpha$$

$$F_{total} = F + F_a + F_v$$
  

Força (N)	976		
Força atrito (N)	195		
Resistência do ar (N)	0		
Ângulo (°)	5,71		

Na roda:	
Potência(kW)	6,51
rpm	185,01
Binário (N.m)	335,89

Exigido ao motor	
Binário (N.m)	82,26

Força total (N)	1171
-----------------	------

Figura 3.11 | Folha de cálculo utilizada para determinação do binário de arranque do motor.

Após a análise dos resultados, verificou-se que o motor elétrico inicialmente selecionado, o LEM200 motor DC de ímãs permanentes com escovas (ver Figura 3.12), não satisfazia os requisitos do veículo, sendo necessário a seleção de um outro motor elétrico.

Em consenso com o Eng.º Ferreira Duarte e o Eng.º Armando Araújo, ficou decidido selecionar o motor elétrico EMRAX (ver Figura 3.13), quer como motor quer como gerador. No entanto, as características do motor EMRAX, os binários e esforços envolvidos obrigaram a uma reformulação das soluções construtivas anteriormente apresentadas. Assim, foi necessário elaborar uma nova solução construtiva que levou a alteração da ligação mecânica entre motor elétrico e caixa de velocidades, entre o motor de combustão interna e o gerador, diferentes suportes do motor/gerador e ainda uma nova localização do gerador elétrico.



Figura 3.12 | Motor Elétrico LMC LEM200.

### 3.3.1 Solução Construtiva Adotada

A necessidade de uma nova solução construtiva obrigou a uma nova análise para a localização dos mais diversos componentes.

Este projeto implica a presença de duas "máquinas elétricas", um funcionando como motor elétrico e responsável pela tração do veículo, e outro como gerador elétrico (alimentado pelo motor de combustão interna presente no veículo) e responsável pelo

carregamento do sistema de armazenamento de energia ou por fornecer diretamente energia elétrica ao motor elétrico.

### 3.3.1.1 Seleção do motor/gerador elétrico

Os motores elétricos escolhidos foram os motores *EMRAX 228* para funcionar como motor elétrico e o motor *EMRAX 207* para funcionar como gerador elétrico. Ambos os motores podem ser refrigerados (ar ou líquido), e são caracterizados por terem todas as dimensões iguais, exceto o seu diâmetro, que são 228 mm e 207 mm respectivamente.



Figura 3.13 | Motor Elétrico EMRAX. [70]

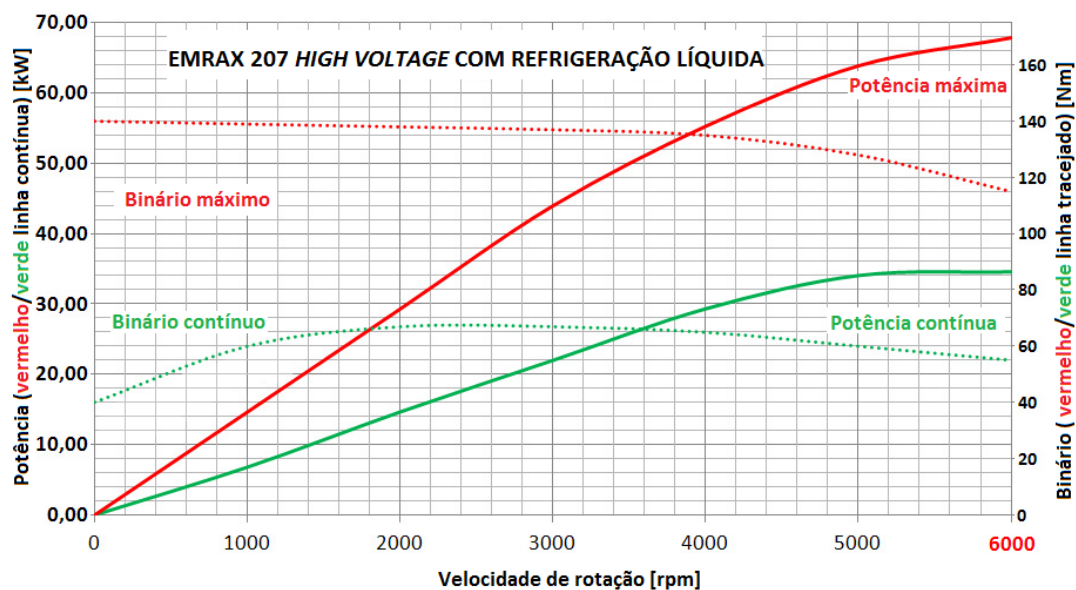
Tabela 3.2 | Características dos equipamentos usados como motor/gerador elétrico. [70]

Dados Técnicos	Características Motores EMRAX			
	EMRAX 207 Medium Voltage		EMRAX 228 Medium Voltage	
Refrigeração	Líquido	Ar	Líquido	Ar
Peso [kg]	8,9	8,8	12,1	11,9
Diâmetro/Largura [mm]	207 / 85		228 / 86	
Gama tensão da bateria [Vdc]	50 - 250 (*290)		50 - 350 (*450)	
Potência max. [kW]	70		100	
Potência contínua [kW]	20 - 35	20 - 30	30 - 50	25 - 40
Vel. Rotação max. [rpm]	5000 (*6000)		4000 (**5000) (*6000)	
Binário max. [Nm]	150		240	
Binário contínuo [Nm]	75		125	
Eficiência nominal [%]	93 - 96		93 - 96	

\* Testado pelo fabricante durante poucos segundos

\*\* Testado pelo fabricante durante poucos minutos

Nas figuras seguintes, serão apresentados os gráficos de potência e os mapas de eficiência dos motores elétricos *EMRAX 207* e *EMRAX 228 High Voltage*. Estes gráficos são em tudo idênticos aos do *Medium Voltage*, segundo informação do fabricante.



Nota 1 - Para determinar a potência máxima e a contínua (kW), deve escolher a velocidade de rotação do motor e depois ler o valor da potência da curva escolhida (no lado esquerdo do gráfico)  
 Nota 2 - Para determinar o binário máximo e o contínuo (Nm), deve escolher a velocidade de rotação do motor e depois ler o valor do binário da curva escolhida (no lado direito do gráfico)

Figura 3.14 | Gráfico de potência do motor EMRAX 207 High Voltage. [70]

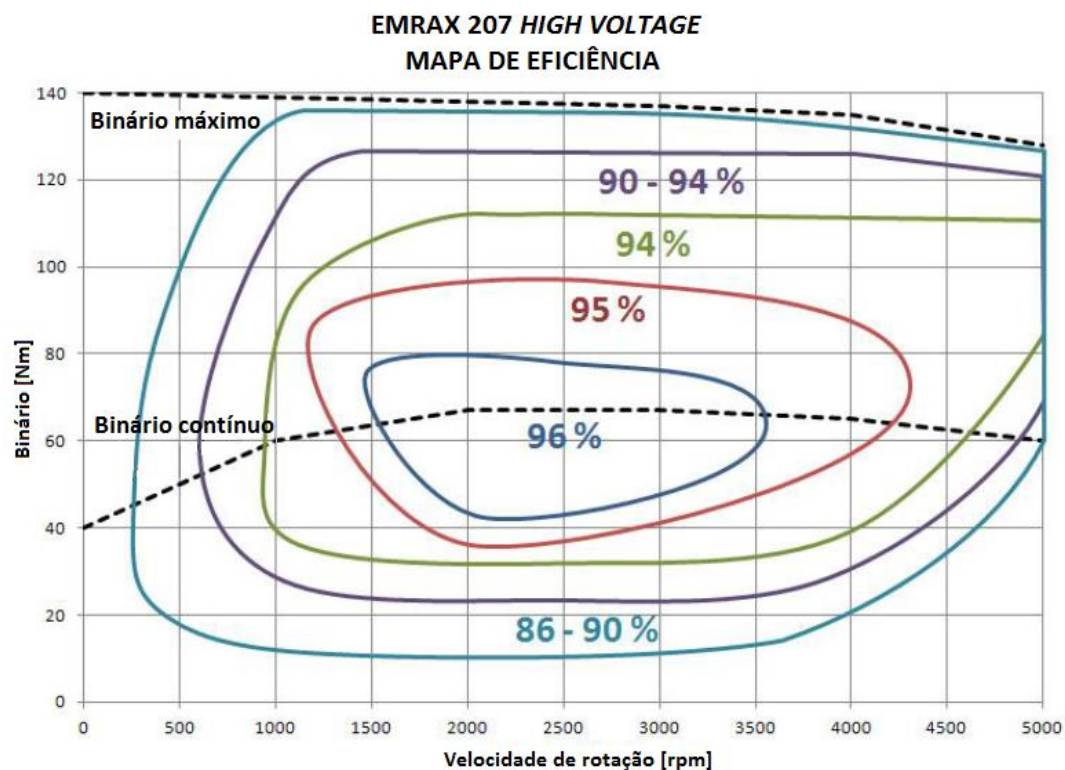


Figura 3.15 | Gráfico do mapa de eficiência do motor EMRAX 207 High Voltage. [70]

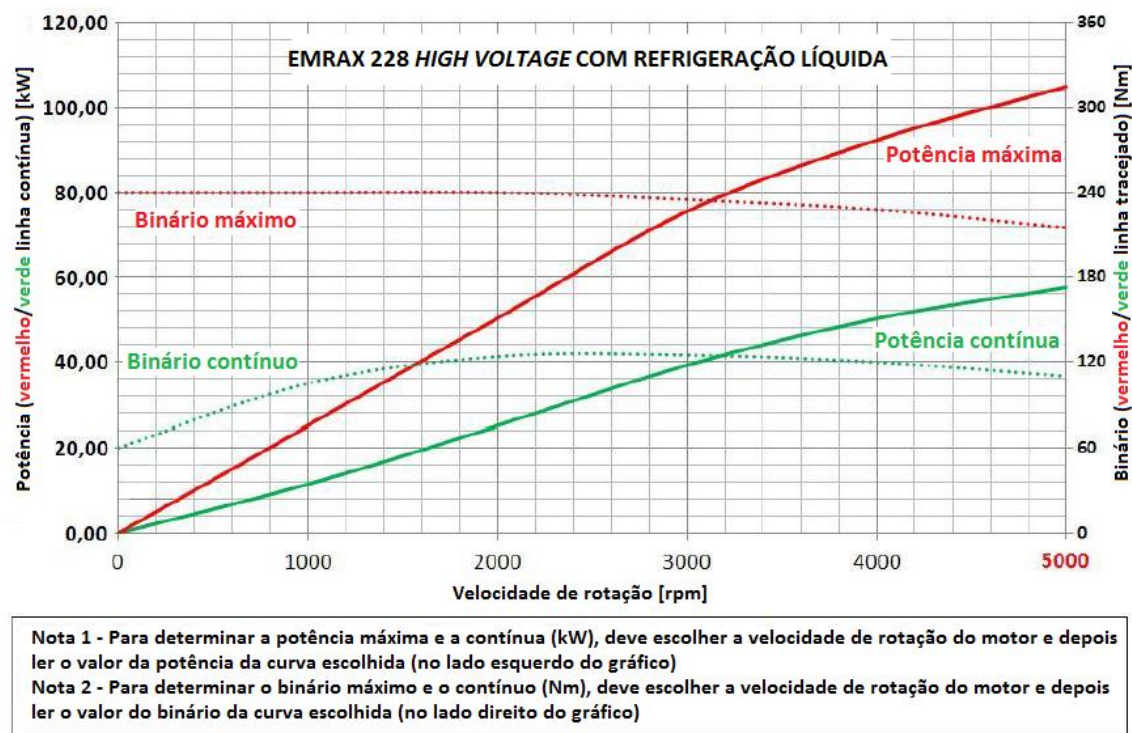


Figura 3.16 | Gráfico de potência do motor EMRAX 228 High Voltage. [70]

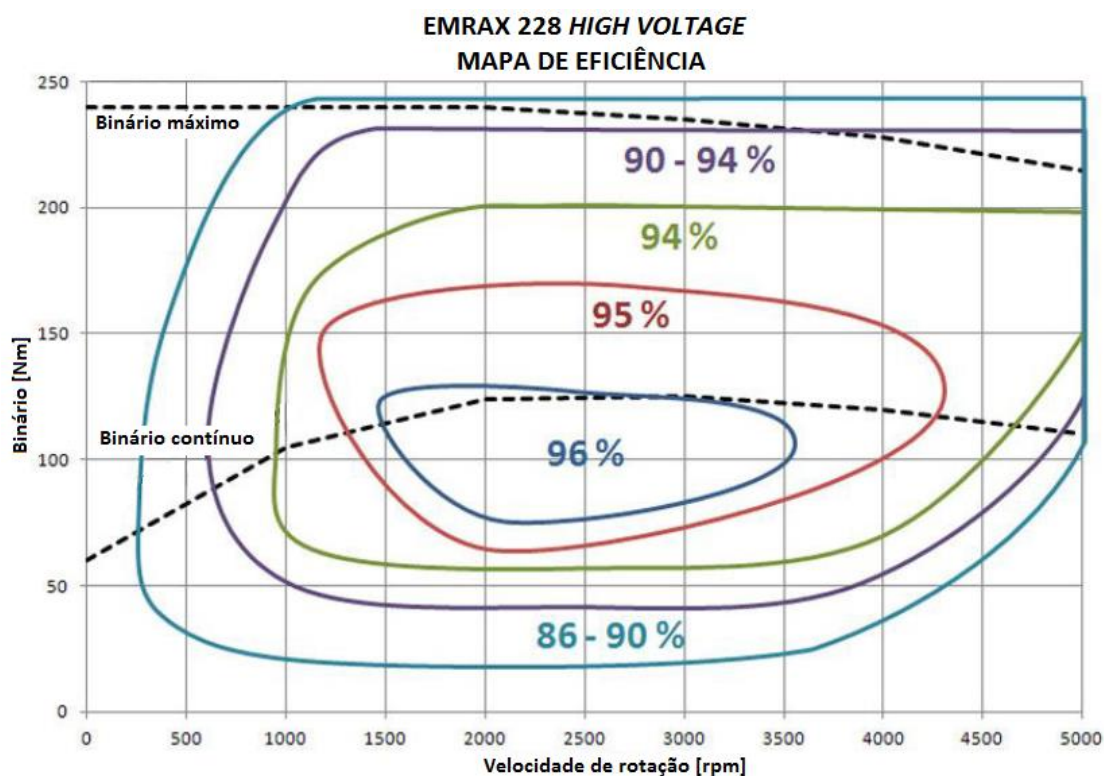


Figura 3.17 | Gráfico do mapa de eficiência do motor EMRAX 228 High Voltage. [70]

A análise das características do motor *EMRAX 207*, Tabela 3.2 e da folha de cálculo apresentada na Figura 3.11, permitem concluir que é possível selecionar este motor como o motor responsável pela tração, pois cumpre os requisitos do veículo. No entanto e neste caso em especial, o motor escolhido foi o *EMRAX 228*, que está claramente



sobredimensionado para este projeto, no entanto o facto de ele já estar disponível nas instalações da faculdade e de permitir economizar recursos financeiros na compra de um novo motor *EMRAX 207*, levou a que se optasse pela sua utilização.

Caraterísticas como a sua velocidade de rotação, binário disponibilizado e potência estiveram na base da escolha dos motores *EMRAX 207* e *228*, para funcionamento como gerador elétrico e motor de tração respetivamente.

### 3.3.1.2 Localização do motor e gerador elétrico no Smart

Ambos os motores elétricos, quer o responsável pela tração quer o gerador elétrico, estão colocados na parte inferior do veículo. O motor elétrico responsável pela tração estará no lado do condutor, enquanto o gerador elétrico do lado do passageiro como pode ser observado na Figura 3.18.



Figura 3.18 | Localização do motor e gerador elétrico no Smart.

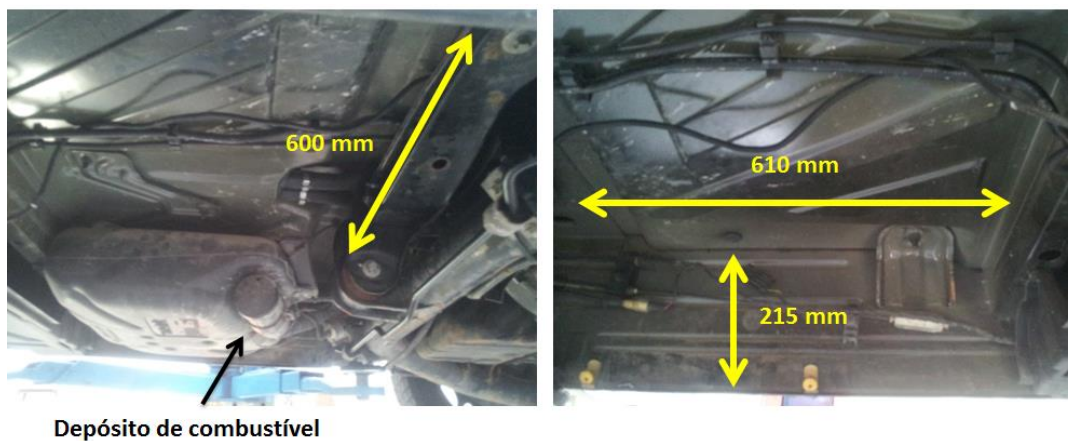
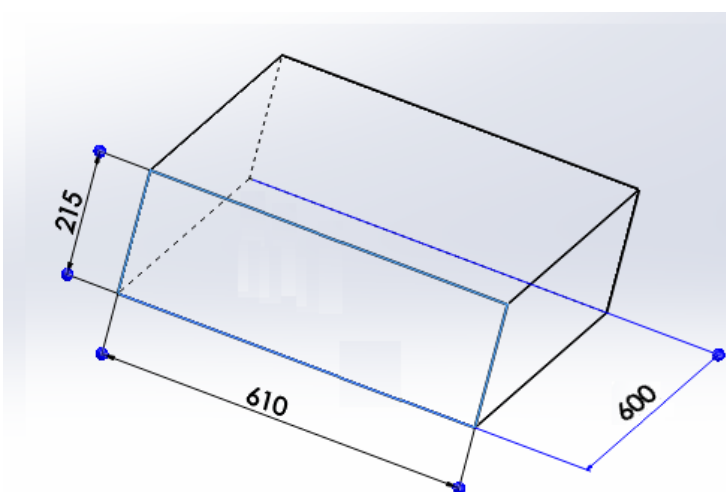


Figura 3.19 | Espaço disponível para colocação do motor e gerador elétrico.

O motor de tração e o gerador elétrico serão fixados à estrutura de apoio do motor de combustão (*chariot*) por intermédio de quatro suportes (dois em cada motor), sendo que esta solução permite que ambos os motores (tração/gerador) se movam em conjunto com o motor de combustão interna (não ocorrendo variação da sua posição relativa).

Na Figura 3.19 é possível observar o espaço que será ocupado por motor e gerador elétrico, bem como o tubo estrutural (*chariot*), e na Figura 3.20 podemos observar o espaço disponível para a colocação do motor e gerador elétrico. Basicamente, o espaço disponível tem a forma de um paralelepípedo, como pode ser observado:



*Figura 3.20 | Espaço disponível, em forma paralelepípedo, para alojamento do motor e gerador elétrico.*

Esta nova solução adotada, em especial a colocação do gerador elétrico na parte inferior do veículo, é mais vantajosa do que a solução dos projetos anteriores, em que o gerador elétrico era colocado no compartimento da mala, por detrás do banco do passageiro. A solução adotada permite a libertação do compartimento da mala, ocupando um espaço que estava disponível e sem função.



*Figura 3.21 | Compartimento da mala do Smart.*

### 3.3.1.3 Material dos suportes do motor e gerador elétrico

Os suportes quer do motor de tração quer do gerador elétrico, os encaixes e os suportes para o veio da polia de tensão, serão produzidos numa liga de alumínio por fundição, a liga selecionada foi da série 7000, mais concretamente o alumínio EN AW 7075, cujas especificações técnicas estão descritas nas tabelas seguintes:

**Tabela 3.3 | Especificações técnicas do alumínio AW7075. [71]**

Características da Liga	
<b>Liga</b>	EN AW 7075
<b>Tipo de liga</b>	Tratado termicamente
<b>Têmpera</b>	T651
<b>Superfície</b>	Laminada

**Tabela 3.4 | Especificações técnicas do alumínio AW7075. [71]**

Propriedades Mecânicas	Dependentes da espessura
<b>Limite de escoamento <math>R_{p0,2}</math> [MPa]</b>	220 - 460
<b>Limite de resistência à tração <math>R_m</math> [MPa]</b>	360 - 540
<b>Alongamento <math>A_{50}</math> [%]</b>	1 - 6
<b>Dureza, Brinell [HB]</b>	104 - 160

**Tabela 3.5 | Especificações técnicas do alumínio AW7075. [71]**

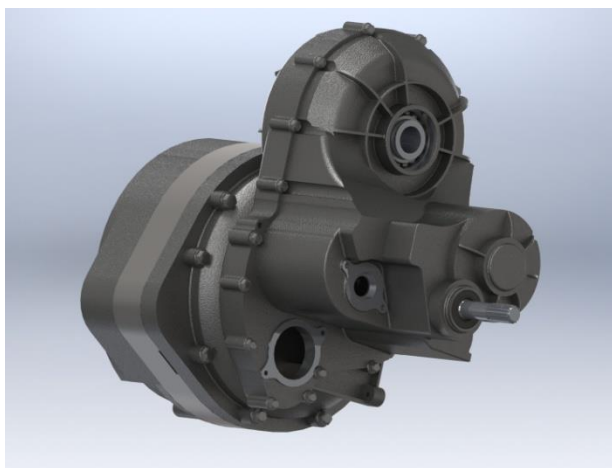
Propriedade Físicas	Valores Típicos
<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,80
<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	71
<b>Condutividade elétrica [m/Ω · mm<sup>2</sup>]</b>	19 - 23
<b>Coefficiente de expansão térmica [K<sup>-1</sup> · 10<sup>-6</sup>]</b>	23,4
<b>Condutividade térmica [W/m · K]</b>	130 - 160
<b>Calor específico [J/kg · K]</b>	862

### 3.3.1.4 Motor de tração: Implicações e respetivo suporte

O motor de tração, como atrás referido, será colocado na parte inferior do veículo, do lado do condutor. Esta solução apresenta, contudo algumas implicações que necessitam ser analisadas:

- Necessidade de inversão do veio primário da caixa de velocidades. A caixa de velocidades será mantida por forma a ser possível utilizar o diferencial presente no veículo;
- Escolha da relação de transmissão final, neste caso, de responsabilidade da caixa de velocidades, pois a caixa estará bloqueada numa velocidade;
- Desenvolvimento de um suporte para o motor de tração que permita manter a posição relativa entre o motor de combustão e o motor elétrico responsável pela tração;
- Implementação de um sistema de transmissão de potência, entre o veio de saída do motor elétrico e o veio primário da caixa de velocidades.

#### 3.3.1.4.1 Inversão do veio primário da caixa de velocidades



*Figura 3.22 | Caixa de velocidades original do Smart.*

A localização do motor elétrico, responsável pela tração do veículo, implica uma alteração da posição relativa do veio primário da caixa de velocidades, de forma a permitir a ligação entre a caixa de velocidades, Figura 3.22, e o motor elétrico, por meio de um mecanismo de transmissão de potência.

A caixa de velocidades será mantida visto facilitar a ligação do motor elétrico ao diferencial do veículo. Para tal foi efetuado um estudo sobre qual a relação de transmissão mais adequada, de forma a cumprir o requisito da velocidade máxima que o veículo deve possuir (120 km/h).





*Figura 3.23 | Eixo primário da caixa de velocidades do Smart.*

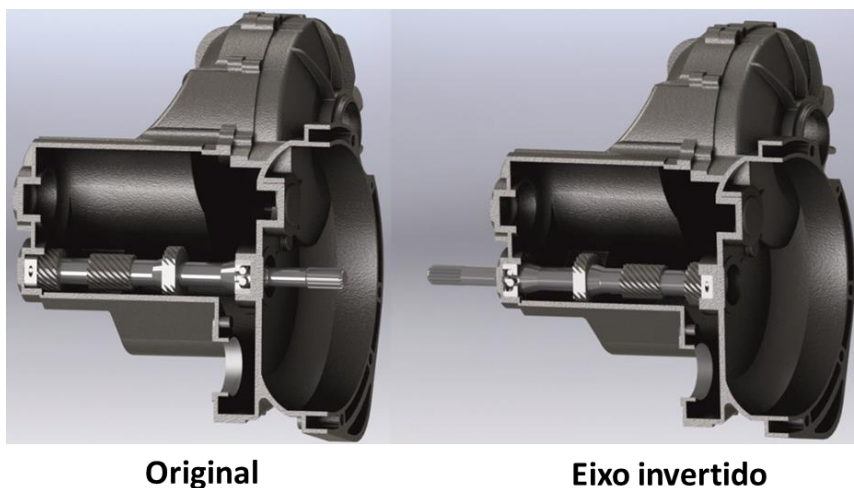
Além da inversão do eixo primário, Figura 3.23, os casquilhos do veio secundário terão de ser reposicionados de forma a fixar a relação de transmissão. Os rolamentos foram também alvo de análise devido ao facto de terem de ser invertidos juntamente com o eixo primário, do qual se concluiu que não haveria qualquer tipo de entrave e que estes continuariam a funcionar sem problemas.

De forma a acomodar esta modificação, a caixa de velocidades teve de ser alterada, e assim foram retiradas as rodas dentadas não utilizadas do veio secundário, Figura 3.24, e ainda todo o mecanismo de seleção de velocidades.



*Figura 3.24 | Veio secundário da caixa de velocidades do Smart.*

Posteriormente, foi realizado um furo na zona da caixa, para permitir que a extremidade do veio primário passe para o exterior, ficando alinhado com o veio do motor elétrico e permitindo desta forma uma ligação entre eles para a transmissão de potência.



Original

Eixo invertido

*Figura 3.25 | Inversão do eixo primário.*

Posteriormente é necessário selecionar e aplicar um vedante com guarda pó no furo realizado, a fim de impedir tanto a fuga de lubrificante como a entrada de impurezas para o interior da caixa de velocidades.

Além desta alteração é necessário maquinar o veio primário de forma a diminuir o seu comprimento, pois dada a sua posição no veículo, entre a nova saída da caixa de velocidades e a suspensão só existem 50 mm.

#### 3.3.1.4.2 Relação de transmissão final

Como foi referido anteriormente, a caixa de velocidades irá ser mantida, de forma a utilizar o diferencial presente no veículo, sendo por isso necessário escolher qual a velocidade em que a caixa ficará bloqueada.

A versão do *Smart ForTwo* adquirido possui 6 velocidades distintas:

*Tabela 3.6 | Relações finais Smart ForTwo adquirido.*

Velocidade	Relações
1ª	14,203
2ª	10,310
3ª	7,407
4ª	5,625
5ª	4,083
6ª	2,933

Tendo em conta que um dos requisitos do projeto é que o veículo tenha uma velocidade máxima de 120 km/h, necessitamos calcular o perímetro da roda do veículo, que nos permitirá obter a velocidade de rotação da roda. Após o cálculo da velocidade de rotação da roda e multiplicando-o pelo valor da relação de transmissão da velocidade

escolhida (Tabela 3.6), obtemos a velocidade de rotação que o motor deverá ter. Seguindo para os cálculos:

**No veículo adquirido é utilizado um pneu 175/55 com jante R15 (em polegadas)**

$$\text{Perímetro [m]} = \left( \frac{15 \times 0,0254}{2} + 0,175 \times 0,55 \right) \times 2\pi = 1,802 \text{ [m]} \quad (2)$$

Então agora passamos ao cálculo da velocidade de rotação da roda com a equação seguinte:

$$n_{\text{roda}}[\text{rpm}] = \frac{v \text{ [m/s]}}{\text{Perímetro[m]}} \Leftrightarrow n_{\text{roda}}[\text{rpm}] = \frac{\frac{120 \times 1000}{3600}}{1,802} \cong 1110 \text{ [rpm]} \quad (3)$$

Finalmente, podemos agora determinar a velocidade de rotação que o motor elétrico deverá possuir para garantir a velocidade de 120 km/h, tendo em conta que a velocidade escolhida foi a quinta com uma relação de 4,083:

$$n_{\text{motor}}[\text{rpm}] = n_{\text{roda}} \times i_{\text{escolhida}} = 1110 \times 4,083 \cong 4532 \text{ [rpm]} \quad (4)$$

O valor obtido para a velocidade de rotação do motor, é exequível com a velocidade de rotação do motor *EMRAX 228* apresentado na Tabela 3.2.

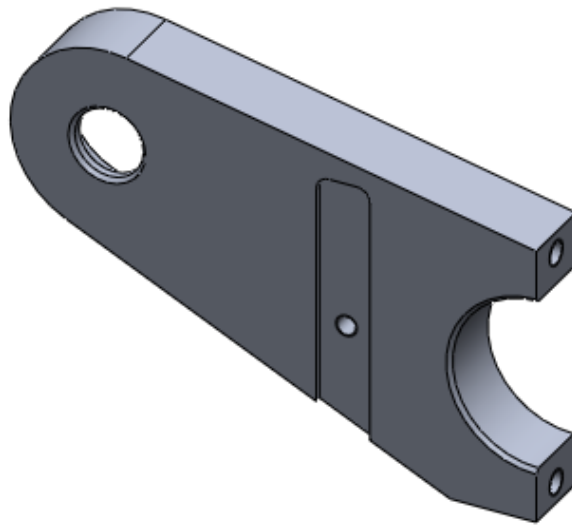
Quanto ao binário de arranque apresentado na folha de cálculo (Figura 3.11) e com o valor de 82,26 N.m, é também satisfeito pelo motor elétrico. Para analisar essa situação, basta recorrermos ao gráfico de potência do motor *EMRAX 228* (Figura 3.16) e verificar que entre as 1000 e 2000 rpm o motor disponibiliza um binário de 240 N.m.

#### 3.3.1.4.3 Definição dos suportes do motor de tração

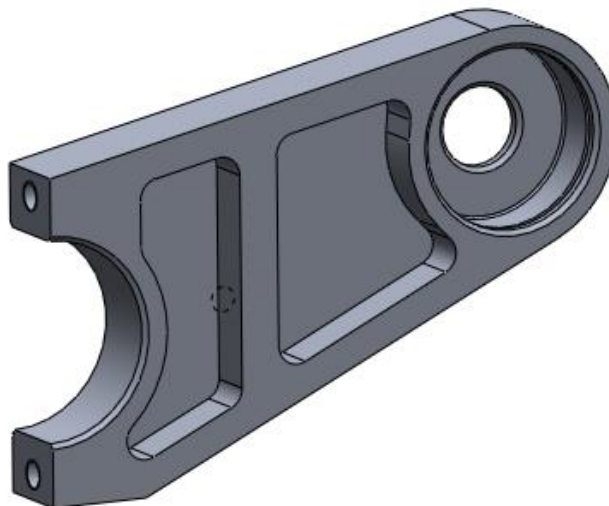
O motor de tração terá dois suportes, um frontal e um traseiro, que vão suportar não só o próprio motor, como alguns componentes necessários para o acoplamento da transmissão (polias e correias de transmissão), bem como outros componentes tais como rolamentos, flanges, parafusos, veio e suporte do veio para a polia de tensão.

O suporte frontal do motor de tração é composto por duas polias e uma correia que será conectada a uma polia acoplada ao veio primário da caixa de velocidades, permitindo a transmissão de potência do motor elétrico para o veio primário da caixa. Uma das polias tem somente a função de tencionar a correia que transfere movimento e o binário do motor elétrico. Importa referir que o suporte desta polia (de tensão) é ajustável, permitindo por isso tencionar a correia sempre que necessário.

O suporte frontal não está ligado diretamente ao motor elétrico. Em vez disso, uma flange será aparafusada ao motor elétrico (parte móvel) de forma a permitir a transmissão de potência para o veio primário da caixa de velocidades. O suporte frontal, com a ajuda do rolamento, servirá de apoio ao veio da flange que irá ainda acoplar uma polia.

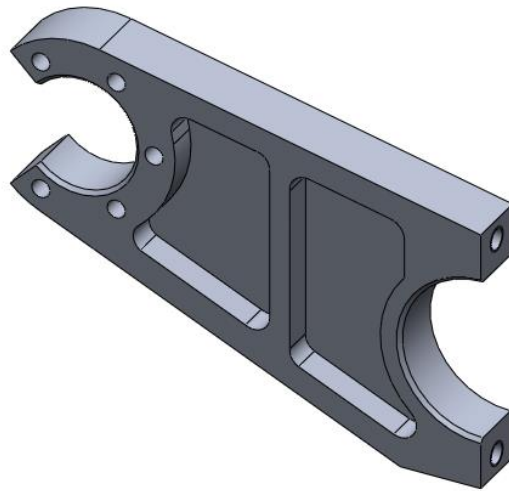


*Figura 3.26 | Suporte frontal do motor de tração.*

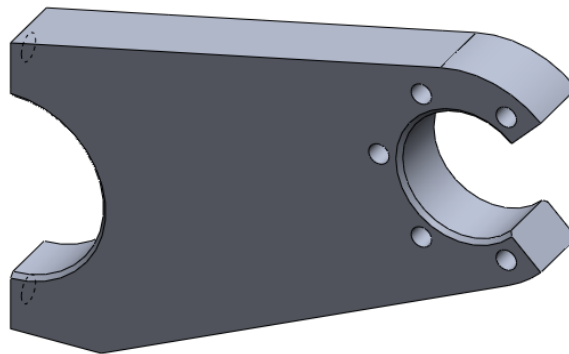


*Figura 3.27 | Suporte frontal do motor de tração.*

Por sua vez, o suporte traseiro do motor de tração, está aparafusado ao motor de tração, numa parte fixa (sem rotação). Entre o motor de tração e o suporte, foi colocado um guiamento/suporte do *resolver* que irá permitir controlar eletronicamente o motor/gerador e também devido à espessura da sua base (2 mm) evitar o contacto do suporte com outra qualquer parte do motor.



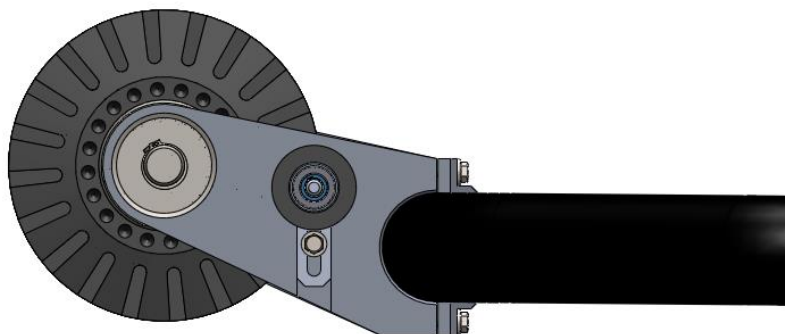
*Figura 3.28 | Suporte traseiro do motor de tração.*



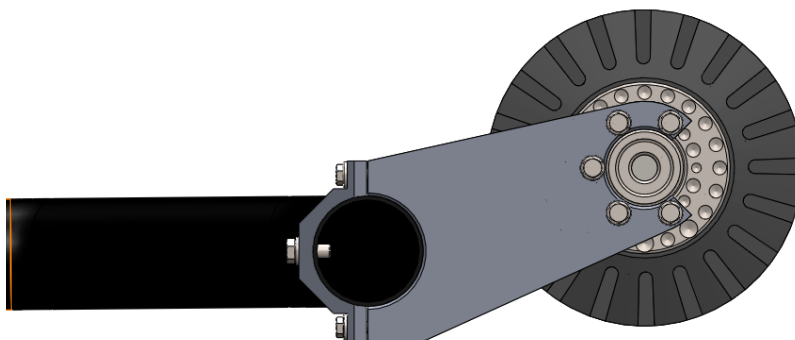
*Figura 3.29 | Suporte traseiro do motor de tração*

Ambos os suportes serão depois fixados ao tubo estrutural, por um encaixe posteriormente aparafuso ao suporte. De forma a garantir o posicionamento dos suportes, serão usados dois parafusos de guiamento entre o encaixe dos suportes e o tubo estrutural.

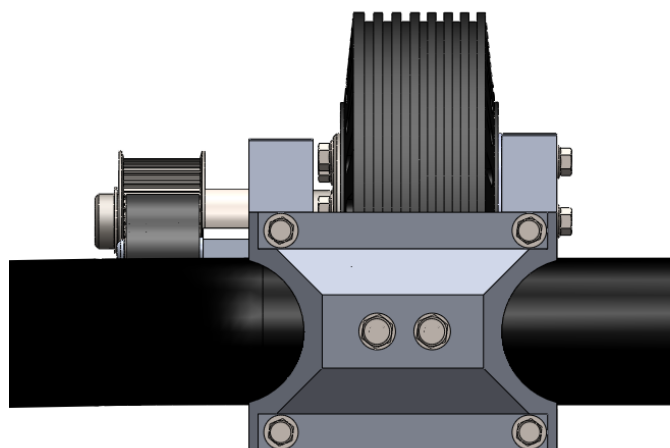
A montagem do motor de tração com os respectivos suportes e demais componentes pode ser visualizado da Figura 3.30 à Figura 3.34



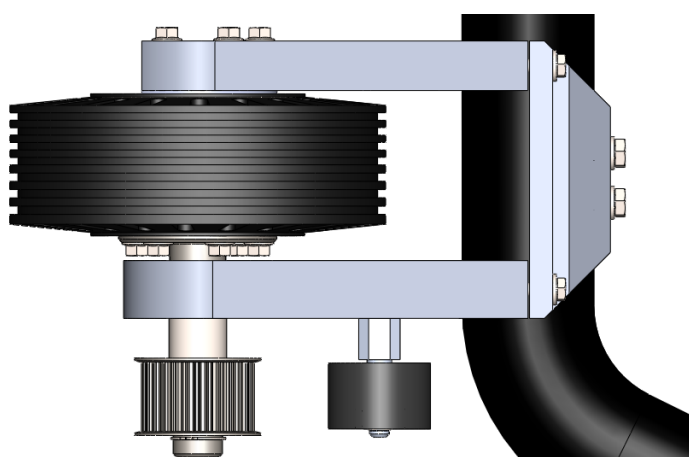
*Figura 3.30 | Montagem da solução adotada para o motor de tração, suporte frontal.*



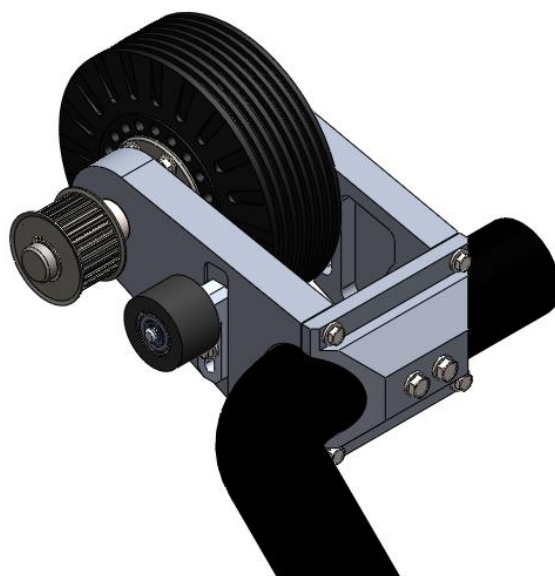
*Figura 3.31 | Montagem da solução adotada para o motor de tração, suporte traseiro.*



*Figura 3.32 | Montagem da solução adotada para o motor de tração, encaixe e guiamento.*



*Figura 3.33 | Montagem da solução adotada para o motor de tração, ligação entre suportes e encaixe.*



*Figura 3.34 | Montagem da solução adotada para o motor de tração, vista isométrica.*

A solução adotada usa outros componentes além dos suportes, encaixe e motor de tração, que tiveram de ser projetados. Esses componentes são o espaçador, a flange, veio da polia tensão e o suporte do veio da polia de tensão. Além destes, temos ainda os parafusos, anilhas, anéis de retenção, rolamentos, casquilhos, polias e correias que foram devidamente dimensionados para satisfazer a solução adotada.

Todos estes componentes serão apresentados mais à frente, pois são usados também na solução adotada para o gerador elétrico.

#### 3.3.1.4.4 Sistema de transmissão de potência

O sistema de transmissão escolhido foi polias/correias, sendo que para a seleção de ambas foi tomado em consideração a velocidade de rotação necessária para o veículo atingir os 120 km/h (velocidade rotação máxima) e a potência fornecida pelo motor elétrico a essa velocidade de rotação. Estes dois dados são fundamentais para a seleção das polias e correias, dado que as correias, em particular, têm de suportar a potência que será fornecida pelo motor elétrico a uma dada velocidade de rotação.

A velocidade de rotação que o motor elétrico deverá possuir é de  $\cong 4534$  rpm como já foi demonstrado anteriormente. Para saber qual a potência fornecida pelo motor elétrico a esta velocidade, recorre-se ao gráfico de potência do EMRAX 228, e verifica-se que para as  $\cong 4534$  rpm, o motor elétrico fornece aproximadamente 55 kW de potência, ver Figura 3.35.



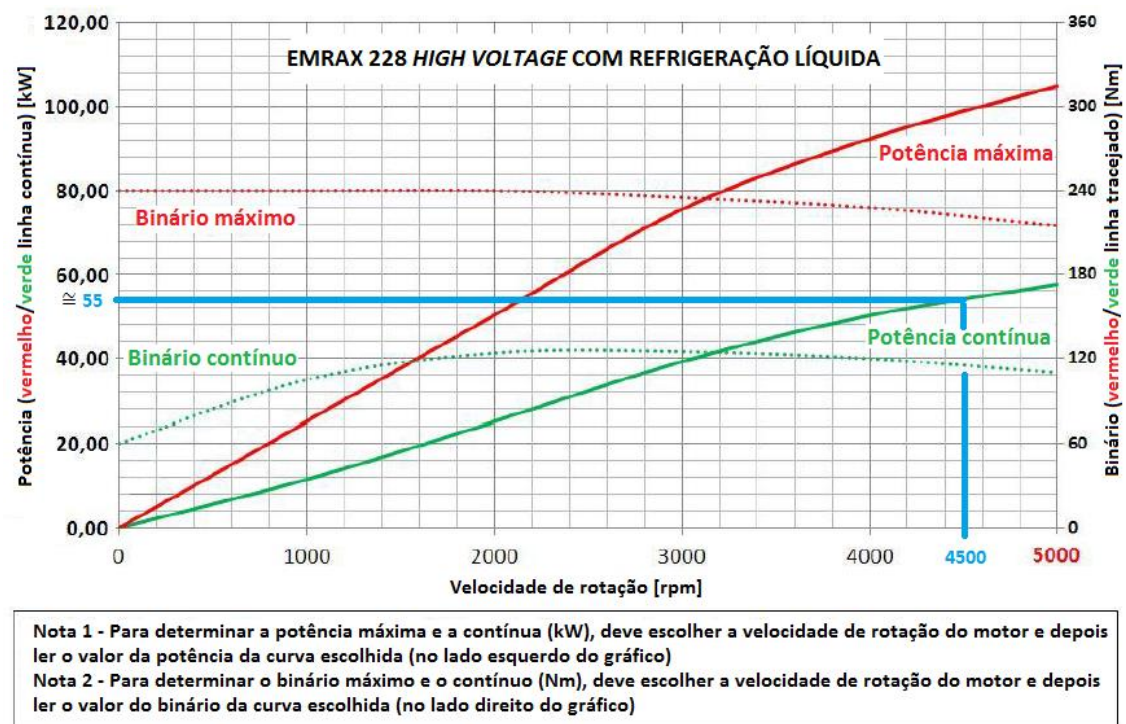


Figura 3.35 | Gráfico de potência do motor EMRAX 228. [70]

Com estes dados, podemos agora avançar para a seleção das polias e correia que serão utilizados nesta solução. A ideia é utilizar elementos comerciais e que sejam facilmente encontrados em empresas especializadas.

A escolha recaiu sobre a empresa *Goodyear*, um dos maiores fabricantes mundiais destes tipos de componentes, e detentor do programa *MaximizerPro 3.0*, especificamente desenvolvido para análise e seleção de polias e correias, ver Figura 3.36 e Figura 3.37.

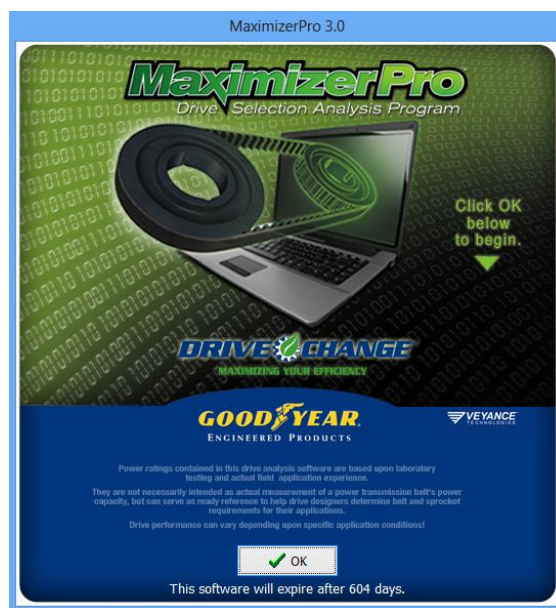


Figura 3.36 | Programa MaximizerPro 3.0.



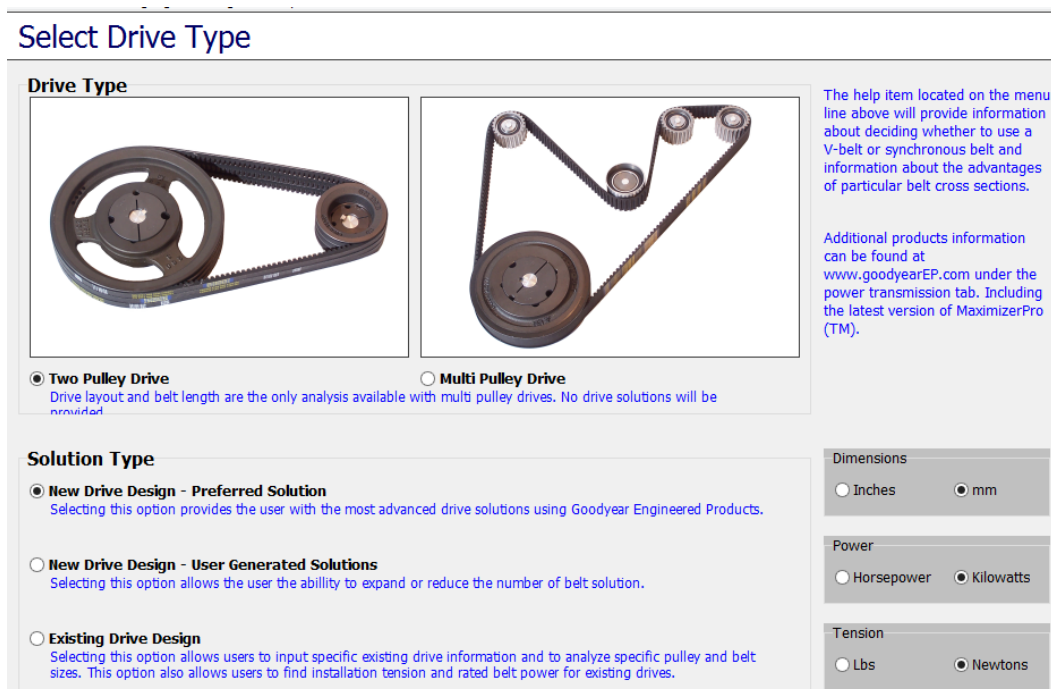


Figura 3.37 | Interface do programa MaximizerPro 3.0.

A seleção das polias e correia parte com base nos dados de entrada, introduzidos pelo utilizador, e são os seguintes: distância entre eixos, velocidade de rotação do motor elétrico, velocidade pretendida no eixo movido, número de dentes das polias, potência fornecida pelo motor elétrico e ainda fator de serviço.

Na Tabela 3.7, são apresentados os dados de entrada para a solução adotada:

Tabela 3.7 | Dados de entrada no software MaximizerPro 3.0.

Parâmetros de entrada	Valores
Distância entre eixos [mm]	448,00
Velocidade rotação do motor [rpm]	4750
Velocidade do eixo movido [rpm]	4750
Número dentes das polias	28
Potência fornecida ao motor elétrico [kW]	55
Fator de serviço	1,5

Dos parâmetros de entrada, o destaque vai para a velocidade de rotação escolhida. Foi utilizada uma velocidade de rotação superior à velocidade de rotação real que o motor irá ter, contudo esta escolha deve-se por motivos de segurança, garantindo desta forma que a correia poderá suportar a título excecional uma velocidade superior sem romper.

Podemos também observar que quer a velocidade de rotação do motor, quer a do eixo movido tem o mesmo valor, isto significa que não irá ser utilizada qualquer redução no sistema de transmissão de potência. Por último, o fator de serviço, este valor foi definido tendo em conta quer a utilização diária do sistema, quer as cargas envolvidas.

Com os valores de entrada definidos para a correia, o *software* calculou quais seriam as polias e correia síncronas comerciais produzidas pela marca e indicadas para esta aplicação, ver Figura 3.38.

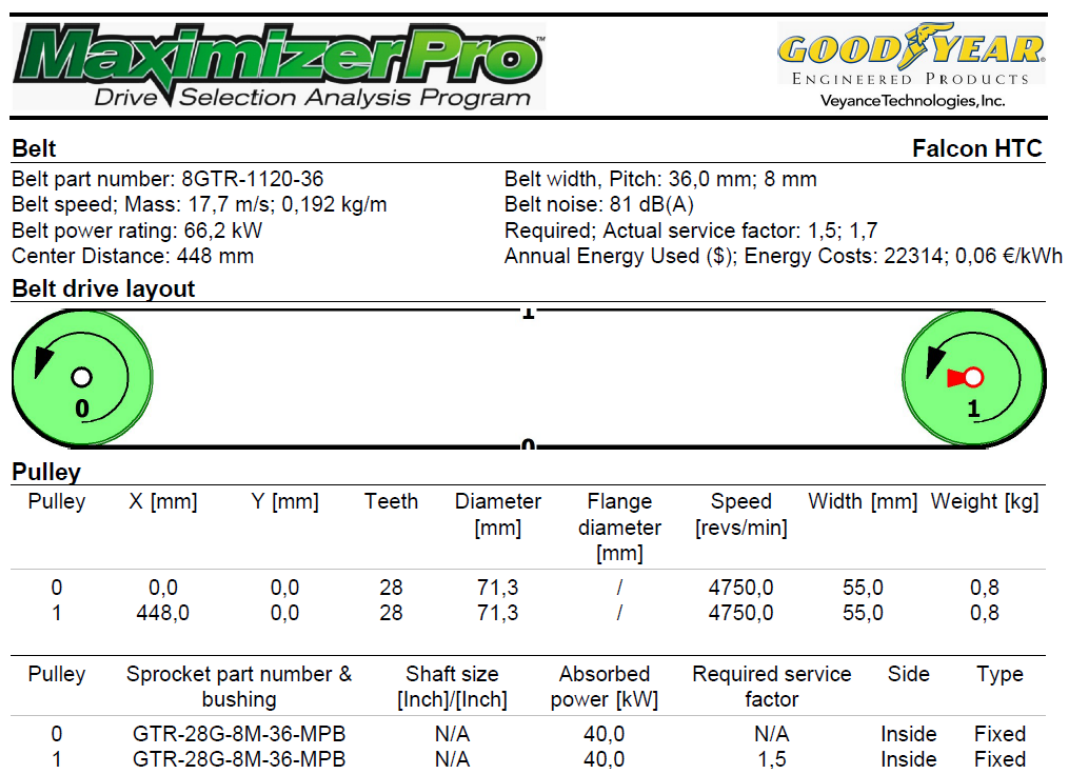


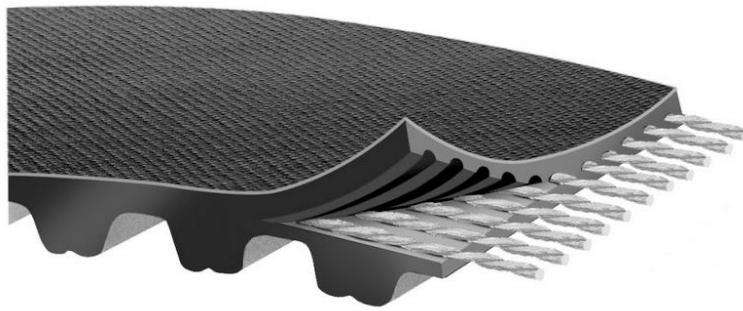
Figura 3.38 | Seleção do programa MaximizerPro para as polias e correia.

Tabela 3.8 | Polias e correia selecionadas.

Seleção das Polias e correia	
Correia	Falcon HTC 8GTR-1120-36
Polias	Falcon HTC GTR-28G-8M-36-MPB

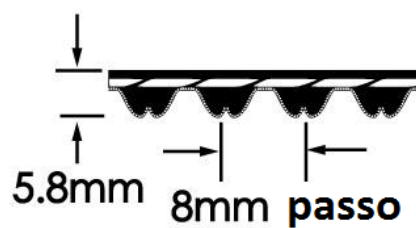
Os resultados da seleção do programa *MaximizerPro* podem ser observados na Tabela 3.8. A potência que a correia pode transmitir é de 66,2 kW, estando claramente acima do que o motor elétrico irá fornecer (aproximadamente 55 kW). Quanto ao fator de serviço, a correia, encontra-se com um patamar confortável de segurança, dado que o fator de serviço requerido é de 1,5 sendo que o fator de serviço permitido pela correia é de 1,7.

Para além destas informações podem ainda ser observados outros dados importantes, como o diâmetro e largura da polia, largura e passo da correia, entre outros.



*Figura 3.39 | Pormenor correia Falcon HTC. [72]*

Falcon HTC® 8M Timing Belts

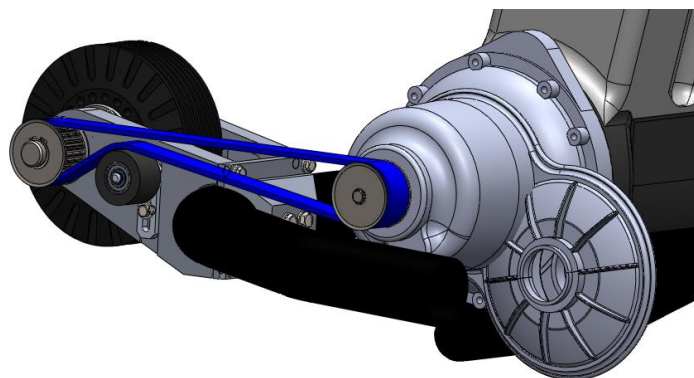


*Figura 3.40 | Dimensões da correia Falcon selecionada. [72]*

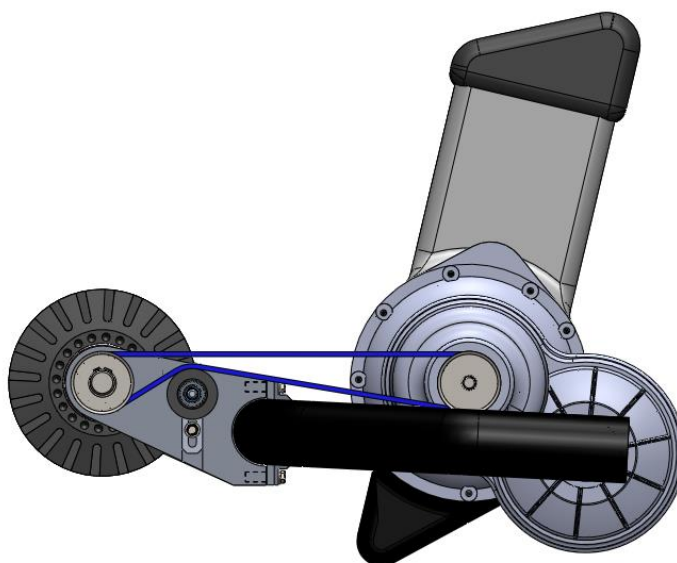


*Figura 3.41 | Exemplo polia Falcon HTC. [72]*

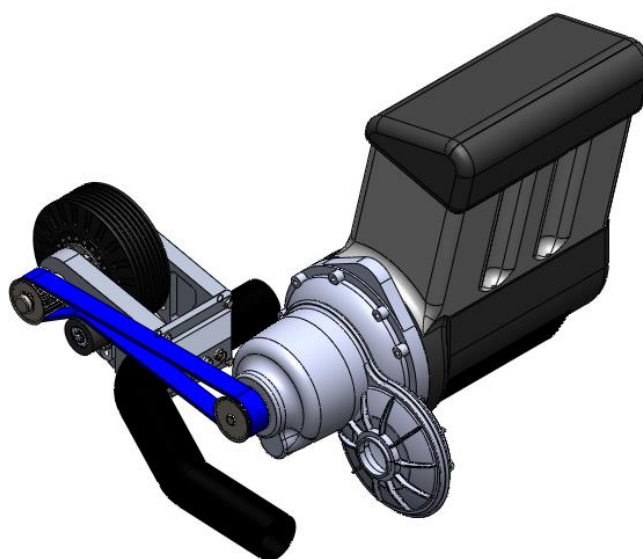
Com a seleção dos componentes responsáveis pelo sistema de transmissão de potência, a solução adotada para o motor de tração é apresentada da Figura 3.42 à Figura 3.44. Nas figuras apresentadas é possível visualizar a caixa de velocidades com o eixo primário invertido, o motor de combustão interna, e o sistema de transmissão de potência adotado para esta solução. A polia de tensão tem nesta solução uma dupla função, é importante para o tensionamento da correia e também para evitar o contacto entre o tubo estrutural e a própria correia do sistema de transmissão de potência.



*Figura 3.42 | Sistema de transmissão de potência entre motor elétrico e veio primário da caixa de velocidades.*



*Figura 3.43 | Sistema de transmissão de potência entre motor elétrico e veio primário da caixa de velocidades, com montagem do motor combustão interna.*



*Figura 3.44 | Sistema de transmissão de potência entre motor elétrico e veio primário da caixa de velocidades, vista isométrica.*

### **3.3.1.5 Gerador elétrico: Implicações e respetivo suporte**

O gerador elétrico, como foi referido anteriormente, será colocado na parte inferior do veículo, do lado do passageiro. Esta solução apresenta, como no caso do motor de tração, algumas situações que necessitam ser analisadas:

- Desacoplamento do volante de inércia, polias e correias do motor de combustão interna que não sejam necessárias para a execução da solução adotada;
- Desenvolvimento de um suporte para o gerador elétrico que permita manter a posição relativa entre o motor de combustão e o gerador elétrico;
- Implementação de um sistema de transmissão de potência, entre o veio do motor de combustão interna e o veio do gerador elétrico;
- Estudar a possibilidade de um possível deslocamento (se necessário) do depósito de combustível.

#### **3.3.1.5.1 Desacoplamento do volante de inércia do motor de combustão interna**

A decisão do desacoplamento do volante de inércia do motor de combustão surgiu na sequência da parceria no projeto do DEEC. Os alunos deste departamento, sugeriram a utilização do gerador elétrico como responsável pelo arranque do veículo, em substituição do volante de inércia (dado o regime de funcionamento do motor de combustão e o binário resistente do gerador). Desta forma, o gerador elétrico, produzirá um binário (carga), que realizará a função de equilibragem do motor, até aqui realizada pelo volante de inércia. Contudo, existe ainda um desafio que tem de ser ultrapassado, que é conhecer a posição da cambota em qualquer instante, função antes realizada pelo volante de inércia por intermédio de um sensor. Este pequeno desafio, ficou a cargo dos alunos do DEEC.

O alternador e a bateria serão mantidos com vista a permitir que todos os equipamentos auxiliares do veículo, tais como luzes, aquecimento, limpa para-brisas, etc., sejam alimentados pelo sistema original do veículo.

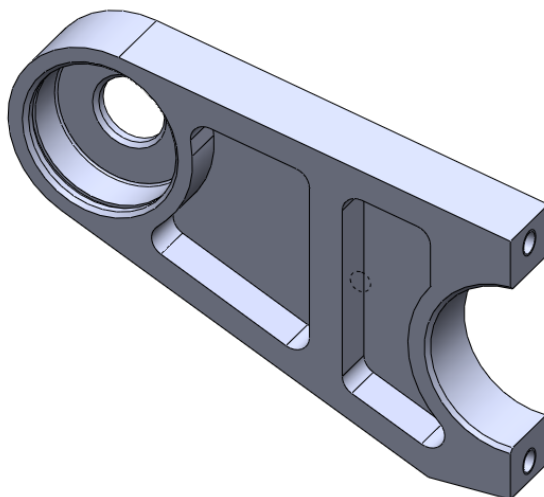
#### **3.3.1.5.2 Definição dos suportes do gerador elétrico**

A solução adotada para o gerador elétrico, é em tudo semelhante à usada no caso do motor elétrico. O gerador elétrico terá dois suportes, um frontal e um traseiro, que vão suportar o peso próprio do motor, todos os componentes necessários ao acoplamento da transmissão, e ainda outros componentes necessários como rolamentos, flanges, etc.

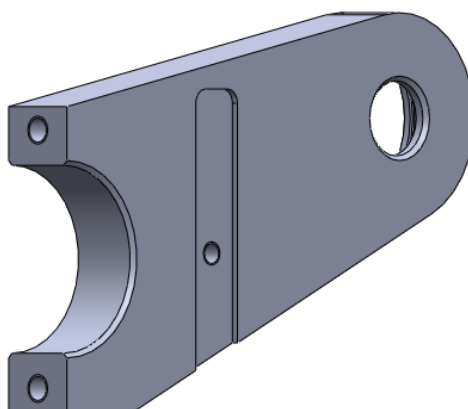
O suporte frontal do gerador elétrico é composto por duas polias e uma correia que será conectada a uma polia acoplada ao veio (cambota) do motor de combustão interna, permitindo a transmissão de potência do motor de combustão interna para o veio do gerador elétrico. Uma das polias acopladas no suporte frontal do gerador elétrico tem somente a função de tencionar a correia que transfere o movimento e o binário do

motor de combustão. O suporte da polia de tensão é ajustável, permitindo desta forma tencionar a correia sempre que necessário.

O suporte frontal não está ligado diretamente ao gerador. Em vez disso, uma flange será aparafusada ao gerador de forma a permitir a transmissão do movimento do motor de combustão interna para o gerador elétrico. O suporte frontal, com a ajuda do rolamento, servirá de apoio ao veio da flange que irá ainda acoplar uma polia. Analisando da Figura 3.45 à Figura 3.48, facilmente se observa que os suportes do gerador elétrico são simétricos aos suportes utilizados para o motor elétrico.

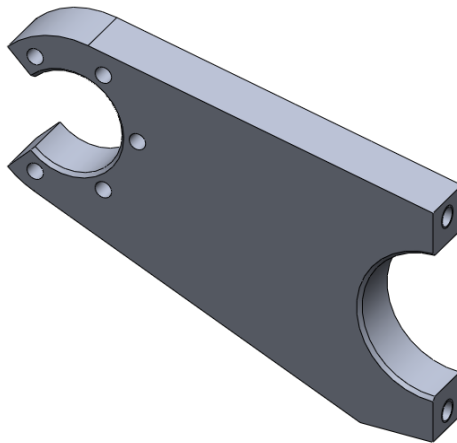


*Figura 3.45 | Suporte frontal do gerador elétrico.*

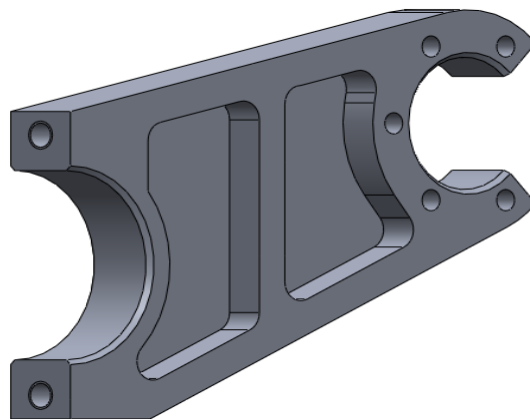


*Figura 3.46 | Suporte frontal do gerador elétrico.*

Por sua vez, o suporte traseiro do gerador elétrico, está aparafusado ao gerador, na parte do estator (sem rotação). Entre o gerador e o suporte, foi colocado um guiamento/suporte do *resolver* que irá permitir controlar eletronicamente o motor/gerador.



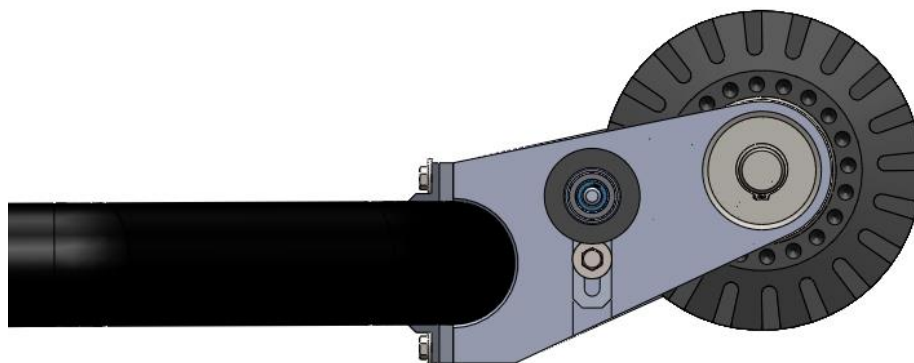
*Figura 3.47 | Suporte traseiro do gerador elétrico.*



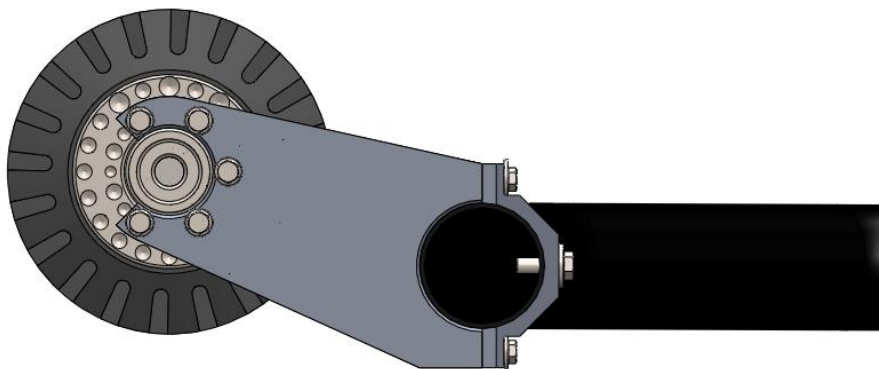
*Figura 3.48 | Suporte traseiro do gerador elétrico.*

Ambos os suportes serão depois fixados ao tubo estrutural, por um encaixe posteriormente aparafuso ao suporte. De forma a garantir o posicionamento dos suportes, serão usados dois parafusos de guiamento entre o encaixe dos suportes e o tubo estrutural.

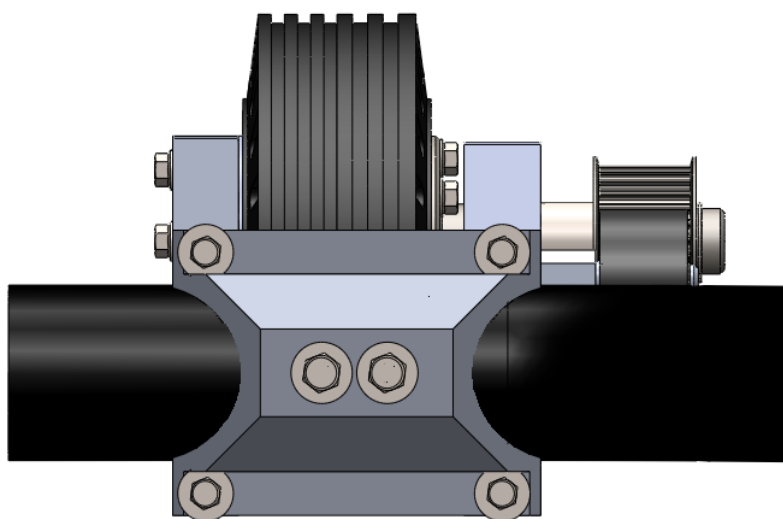
A montagem do motor de tração com os respectivos suportes e demais componentes pode ser visualizado da Figura 3.49 à Figura 3.53.



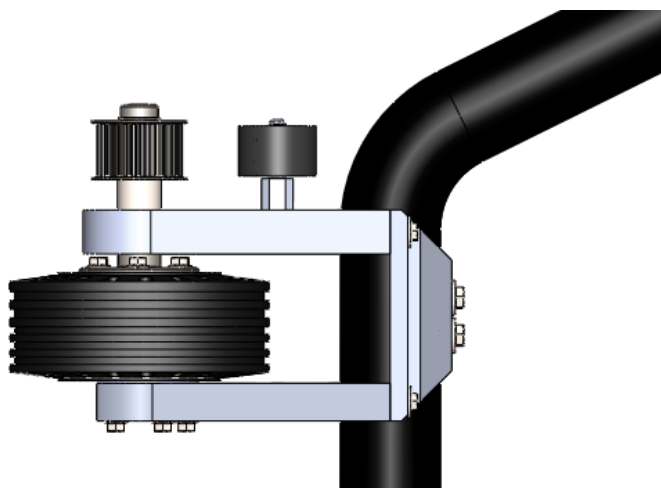
*Figura 3.49 | Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, suporte frontal.*



*Figura 3.50 | Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, suporte traseiro.*



*Figura 3.51 | Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, encaixe e guiamento.*



*Figura 3.52 | Montagem da solução adotada para o motor de tração, ligação entre suportes e encaixe.*



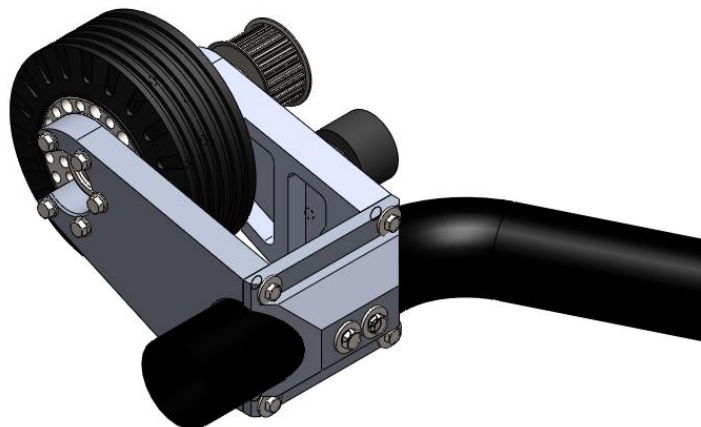


Figura 3.53 | Montagem da solução adotada para o gerador elétrico, vista isométrica.

### 3.3.1.5.3 Sistema de transmissão de potência

A transmissão de potência entre o veio de saída (cambota) do motor de combustão interna e o veio do gerador elétrico será também efetuado por polias e correia. Recorrendo ao manual de instruções do veículo adquirido, confirmou-se que o veículo possui um binário nominal de 70 N.m às 3.000 rpm. Partindo destes parâmetros é possível determinar a potência debitada pelo motor de combustão interna.

$$Potência[W] = Binário[N.m] \times Vel.rotação[rpm] \Leftrightarrow \quad (5)$$

$$Pot[W] = 70 \times 3000 \times \frac{2\pi}{60} = 24190 [W] \cong 24,2 [kW] \quad (6)$$

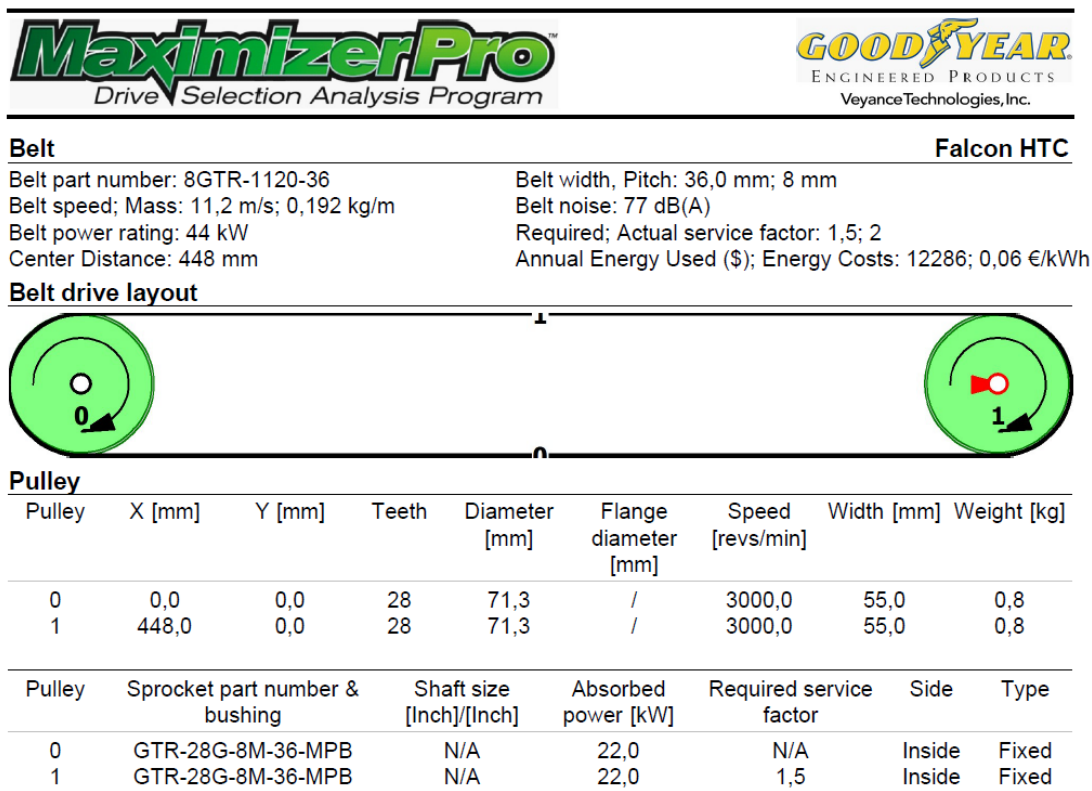
Para a seleção das polias e correia, recorre-se de novo ao programa *MaximizerPro*, e introduz-se no programa os dados de entrada conhecidos e calculados.

Na Tabela 3.9, são apresentados os dados de entrada para a solução adotada:

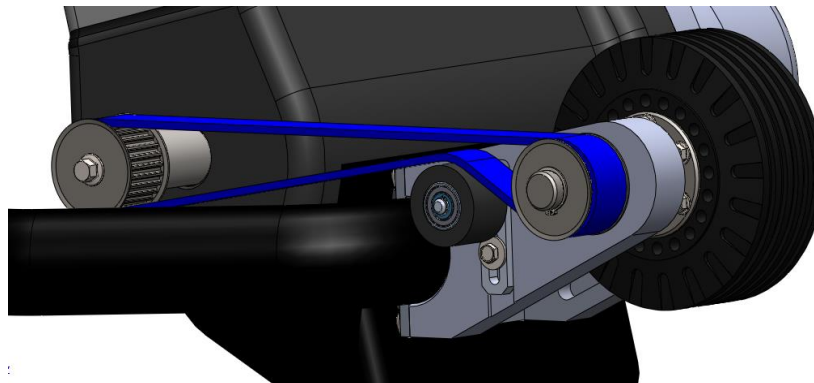
Tabela 3.9 | Dados de entrada no software *MaximizerPro 3.0*.

Parâmetros de entrada	Valores
Distância entre eixos [mm]	448
Velocidade rotação do motor [rpm]	3000
Velocidade do eixo movido [rpm]	3000
Número dentes das polias	28
Potência fornecida MCI [kW]	24,2
Fator de serviço	1,5

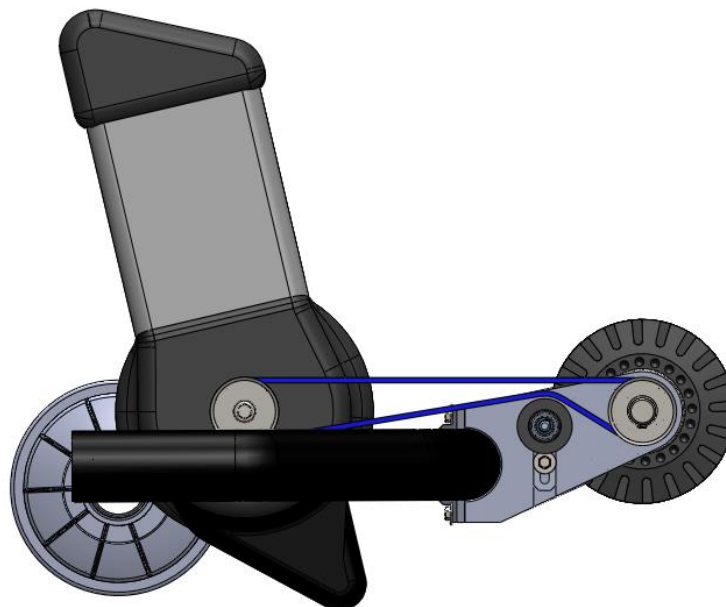
Com os valores de entrada definidos para a correia, o software calculou quais seriam as polias e correia síncrona comerciais produzidas pela marca e indicadas para esta aplicação, ver Figura 3.54 e Tabela 3.10.



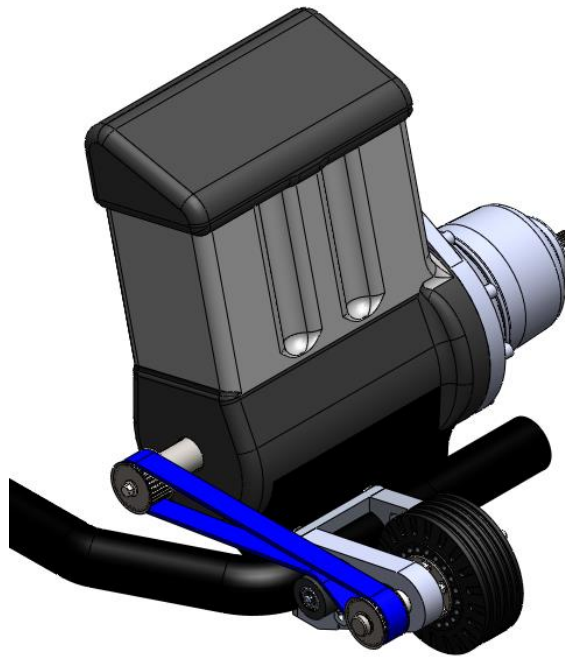
A polia de tensão mantém as mesmas funcionalidades apresentadas na solução adotada para o motor de tração, isto é, tensionamento da correia e evitar o contacto entre o tubo estrutural e a correia de transmissão de potência.



*Figura 3.55 | Sistema de transmissão de potência entre gerador elétrico e veio do motor de combustão interna.*

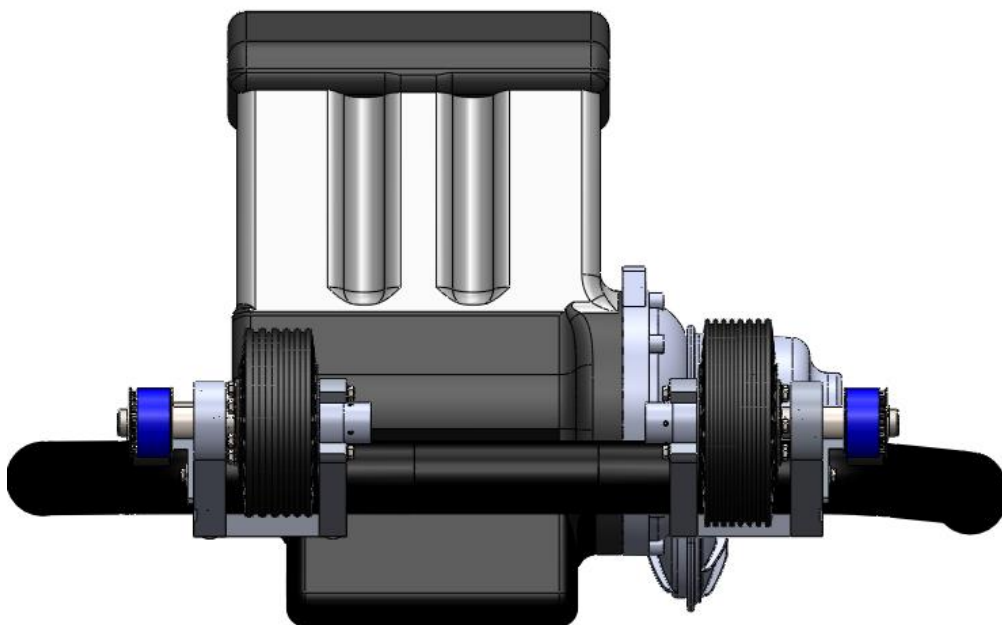


*Figura 3.56 | Sistema de transmissão de potência entre gerador elétrico e veio do motor de combustão interna, vista lateral.*

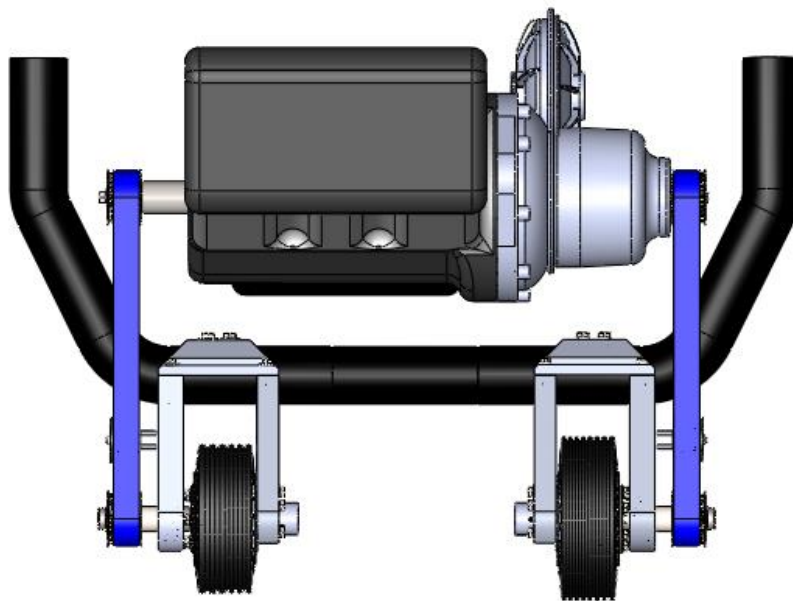


*Figura 3.57 | Sistema de transmissão de potência entre gerador elétrico e veio do motor de combustão interna, vista isométrica.*

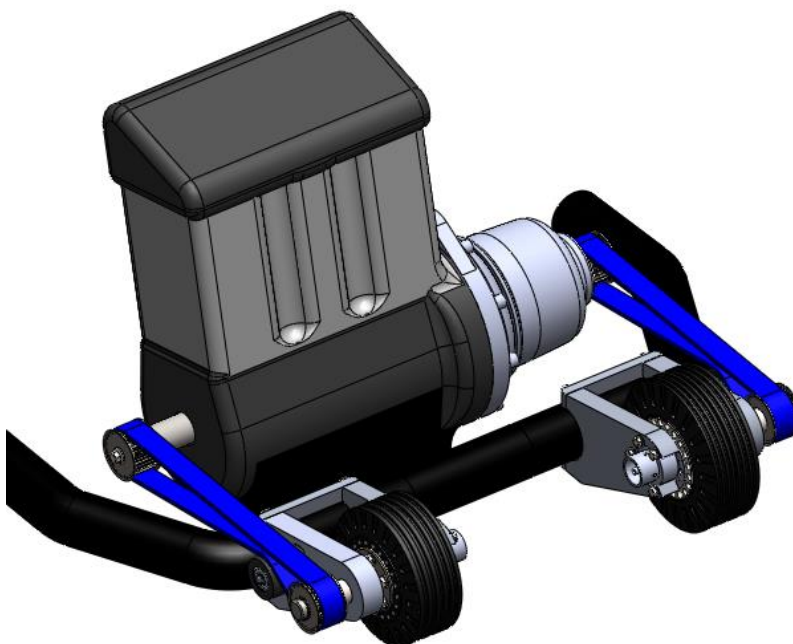
Apresentada individualmente cada uma das soluções adotadas do motor elétrico (responsável pela tração do veículo), e do gerador elétrico (responsável por alimentar o sistema de armazenamento), pode-se visualizar da Figura 3.58 à Figura 3.60 a solução conjunta.



*Figura 3.58 | Montagem das soluções adotadas, vista topo.*



*Figura 3.59 | Montagem das soluções adotadas, vista superior.*



*Figura 3.60 | Montagem das soluções adotadas, perspectiva global.*

### **3.3.1.6 Componentes projetados para as soluções adotadas**

Conforme foi referido anteriormente, foram projetados vários componentes que permitiram chegar à solução apresentada. Entre esses componentes estão a flange, o veio e o suporte da polia de tensão, o veio para controlo eletrónico do motor, o encaixe

dos suportes e ainda o guiamento/suporte do *resolver* (transdutor de posição absoluto que gera sinais analógicos).

Os componentes que em seguida serão apresentados foram aplicados em ambas as soluções adotadas (motor de tração e gerador elétrico).

Alguns destes componentes, como é o caso da flange, veio do suporte para a polia de tensão, veio para controlo eletrónico do motor/gerador e o guiamento/suporte do *resolver* foram produzidos em aço CK45, cujas especificações técnicas são apresentadas em seguida:

*Tabela 3.11 | Especificações técnicas do aço CK 45.*

Aços de construção (carbono)	
<b>Norma DIN / AISI</b>	CK45 / 1045
<b>Marca</b>	F 10
<b>Composição química</b>	45% Carbono, ≤ 40% Silício, 65% Manganês
<b>Fornecimento/Estado</b>	Normalizado

*Tabela 3.12 | Especificações técnicas do aço CK 45.*

Propriedades Mecânicas	Dependentes do diâmetro
<b>Limite de escoamento <math>R_{p0,2}</math> [MPa]</b>	≥ 33
<b>Limite de resistência à tração <math>R_m</math> [MPa]</b>	≥ 59
<b>Alongamento <math>A_{50}</math> [%]</b>	≥ 4
<b>Dureza, Brinell [HB]</b>	207

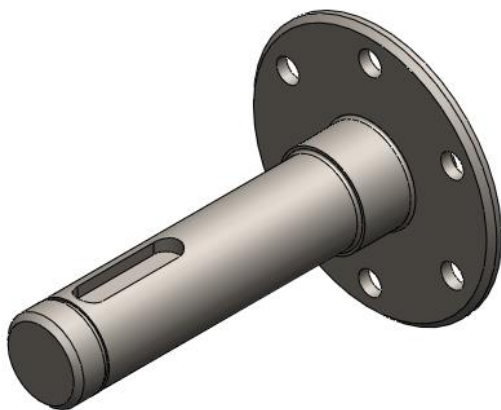
*Tabela 3.13 | Especificações técnicas do aço CK 45.*

Propriedade Físicas	Valores Típicos
<b>Densidade [g/cm³]</b>	7,84
<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>	190 - 210
<b>Condutividade térmica [W/m · K]</b>	11,6 - 15,1

#### 3.3.1.6.1 Flange

A flange, ver Figura 3.61 e Figura 3.62, é o componente responsável pela transmissão de movimento do motor/gerador elétrico para as polias do sistema de transmissão de potência. O componente está diretamente aparafusado ao motor/gerador por intermédio de seis parafusos M8 de cabeça hexagonal com flange.

A flange irá acomodar um casquilho (espaçador), um rolamento que estará inserido no próprio suporte, e uma polia chavetada na extremidade do componente. Esta polia será "fixa" à flange através de um anel de retenção. Do lado onde irá encostar o motor, a flange possui um furo roscado *M12* passo fino, para acomodar um veio que terá como função controlar eletronicamente o motor.



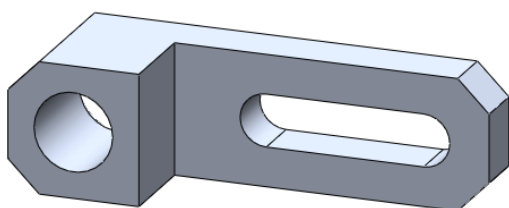
*Figura 3.61 | Flange motor/gerador.*



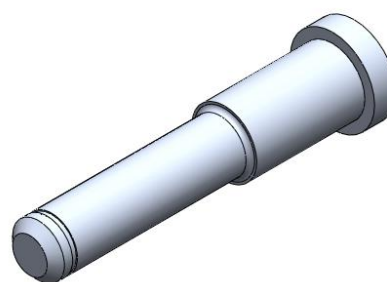
*Figura 3.62 | Flange motor/gerador.*

#### 3.3.1.6.2 Veio e Suporte da polia de tensão

Estes componentes, em conjunto com a polia, permitem a realização de duas funções: tencionar a correia e evitar o contacto entre a correia e o tubo estrutural. O suporte para o veio está fixo ao suporte frontal por intermédio de um parafuso *M8* e uma anilha, sendo que este suporte é ajustável permitindo tencionar desta forma a correia. O suporte frontal tem um guiamento, no qual o suporte para o veio irá acoplar ficando desta forma o seu movimento limitado. Estes pormenores podem ser analisados da Figura 3.63 à Figura 3.65.



*Figura 3.63 | Suporte do veio para polia de tensão.*



*Figura 3.64 | Suporte do veio para polia de tensão.*

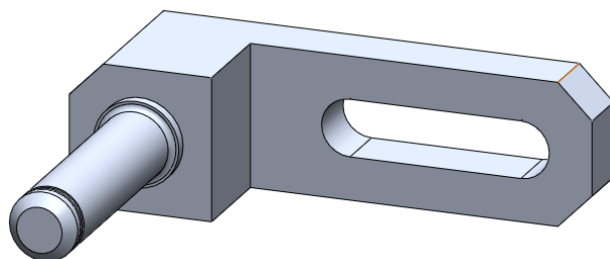


Figura 3.65 | Montagem no suporte do veio para polia tensão.

#### 3.3.1.6.3 Veio para controlar eletronicamente o motor/gerador elétrico

O projeto deste veio surgiu já na fase final do projeto, e foi proposto pelo DEEC, com a finalidade de ser utilizado no controlo eletrónico do motor/gerador elétrico.

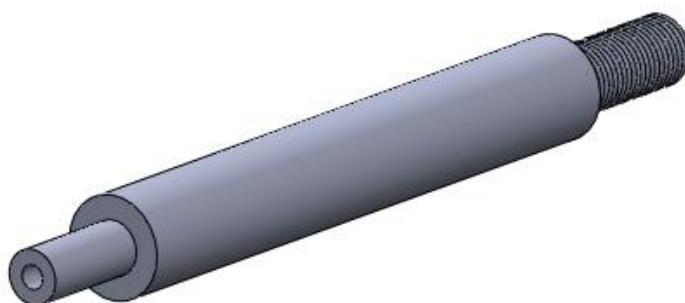


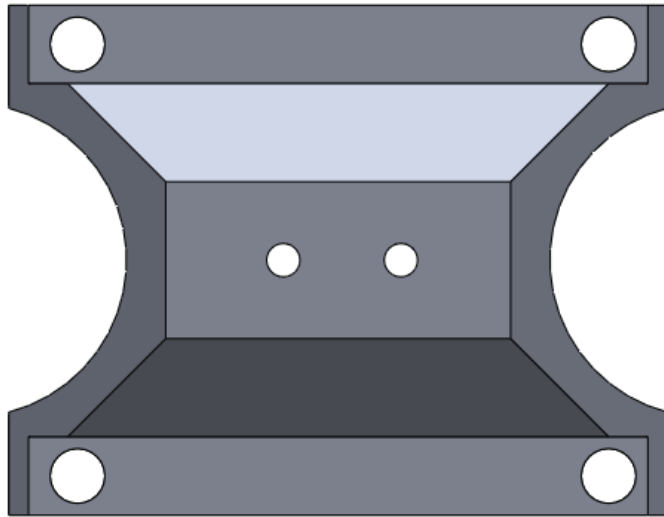
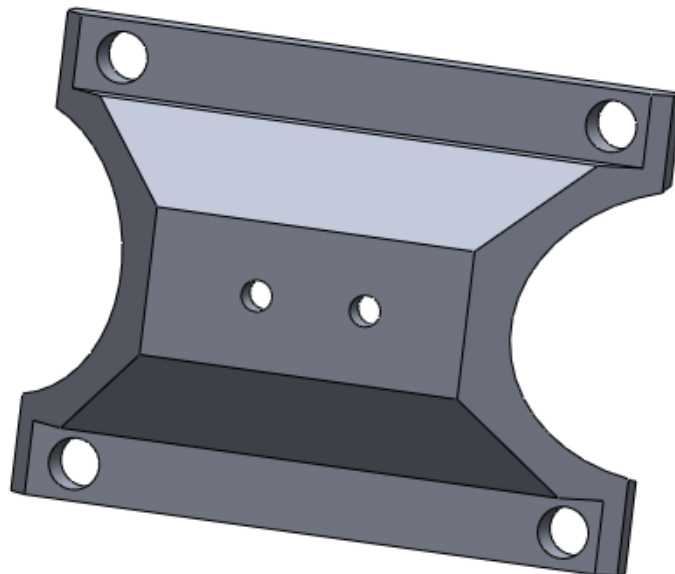
Figura 3.66 | Veio para controlo do motor/gerador elétrico.

Este veio tem nas suas duas extremidades diferentes funções. Na extremidade roscada, o veio ficará diretamente aparafusado à flange anteriormente apresentada, garantindo assim o controlo da transmissão de movimento do motor/gerador. A outra extremidade ficará acoplada a um suporte/guiamento do *resolver*, o qual será fixado por intermédio de uma anilha e um parafuso *M5* ao veio, ver Figura 3.66.

#### 3.3.1.6.4 Encaixe para fixação dos suportes do motor/gerador elétrico

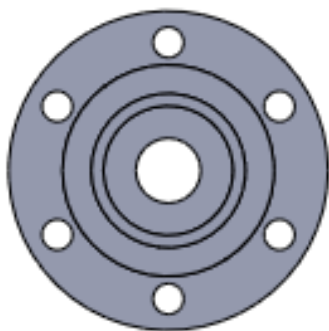
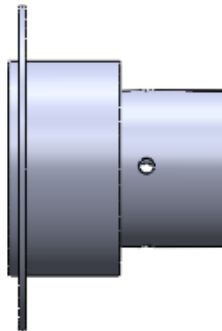
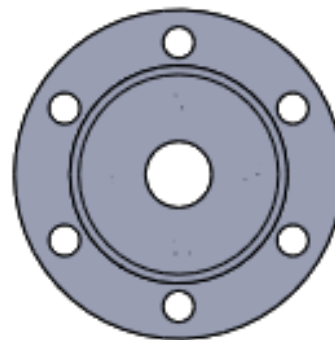
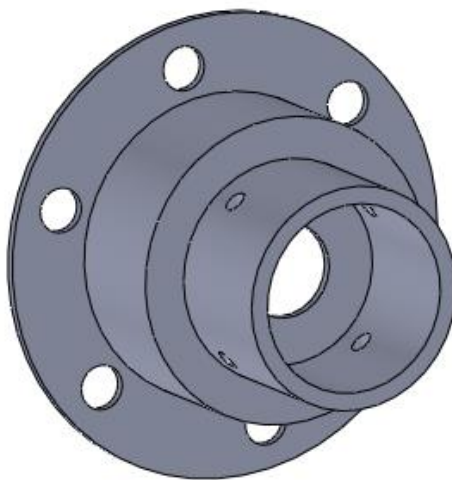
Este componente é o responsável pela fixação de ambos os suportes (frontal e traseiro), que vão acoplar o motor/gerador elétrico, ao tubo estrutural (*chariot*) do veículo. Este componente irá ficar aparafusado a cada suporte por dois parafusos *M8*. Por forma a garantir o posicionamento da estrutura de suporte, vão ser usados dois parafusos *M10* que vão fixar o suporte ao tubo estrutural (com ligação tipo pino), evitando desta forma que exista uma rotação em torno do eixo do tubo estrutural. O encaixe utilizado nas duas soluções, quer para o motor de tração quer para o gerador elétrico, pode ser visualizado da Figura 3.67 à Figura 3.69.



*Figura 3.67 | Encaixe, vista frontal.**Figura 3.68 | Encaixe, vista lateral.**Figura 3.69 | Encaixe, em perspectiva.*

#### 3.3.1.6.5 Guiamento/Suporte do Resolver

Este componente surgiu já na parte final do projeto, na sequência da parceria com o DEEC (Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Após apresentados os requisitos por parte do DEEC, este componente foi projetado de forma a satisfazer esses mesmos requisitos, que permitem o controlo eletrónico do motor/gerador eléctrico. O guiamento/suporte pode ser visualizado da Figura 3.70 à Figura 3.73.

*Figura 3.70 | Vista frontal.**Figura 3.71 | Vista lateral.**Figura 3.72 | Vista traseira.**Figura 3.73 | Vista em perspectiva.*

### **3.3.1.7 Outros componentes utilizados nas soluções adotadas**

Neste capítulo será feita referência a outros componentes utilizados nas soluções apresentadas, tais como rolamentos e anéis de retenção.

Todos estes componentes foram devidamente dimensionados, no caso dos rolamentos, foram tidas em consideração as forças envolvidas de forma a garantir a correta seleção dos mesmos.

Quanto aos anéis de retenção foi tido em consideração os diâmetros dos veios/caixas e ainda as tolerâncias exigidas para o projeto de desenho de fabrico.

#### **3.3.1.7.1 Rolamentos**

Para o correto dimensionamento dos diversos rolamentos utilizados no nosso projeto, foi utilizado o *software* de cálculo da empresa *Schaeffler*. Foram escolhidos para este projeto, rolamentos de esferas, com proteção anticorrosiva e vedação de lábio de ambos os lados.

Os rolamentos selecionados para cada um das polias que estarão nas flanges, foi selecionado o rolamento *S6306-2RSR* da *FAG*, as suas dimensões principais podem ser visualizadas na Figura 3.74.

**Manivela de esferas S6306-2RSR**  
medidas principais conforme DIN 625-1, com proteção anticorrosiva, vedação de lábio de ambos os lados

<b>d</b>	30 mm
<b>D</b>	72 mm
<b>B</b>	19 mm
<b>D<sub>2</sub></b>	61,6 mm
<b>d<sub>a</sub> max</b>	65 mm
<b>d<sub>1</sub></b>	44,6 mm
<b>d<sub>a</sub> min</b>	37 mm
<b>r<sub>a</sub> max</b>	1 mm
<b>r<sub>min</sub></b>	1,1 mm

**m** 0,365 kg **Peso**

<b>C<sub>r</sub></b>	22630 N	capacidade de carga dinâmica, radial
<b>C<sub>0Tr</sub></b>	12080 N	capacidade de carga estática, radial
<b>n<sub>G</sub></b>	6300 1/min	velocidade limite
<b>n<sub>B</sub></b>	0 1/min	velocidade nominal
<b>C<sub>ur</sub></b>	1020 N	carga limite de fadiga, radial

**Figura 3.74 | Dimensões do rolamento de esferas selecionado. [73]**

Os rolamentos utilizados nas polias de tensão (dois em cada uma), serão os rolamentos de esferas 6301-2RSR também da FAG, as suas dimensões principais podem ser visualizadas na Figura 3.75.

### Rolamento de esferas S6301-2RS

medidas principais conforme DIN 625-1, com proteção anticorrosiva, vedação de lábio de ambos os lados

<b>d</b>	12 mm
<b>D</b>	37 mm
<b>B</b>	12 mm
<b>D<sub>2</sub></b>	31,4 mm
<b>D<sub>a max</sub></b>	31,4 mm
<b>d<sub>1</sub></b>	19,5 mm
<b>d<sub>a min</sub></b>	17,6 mm
<b>r<sub>a max</sub></b>	1 mm
<b>r<sub>min</sub></b>	1 mm

<b>m</b>	0,065 kg	Peso
<b>C<sub>r</sub></b>	8240 N	capacidade de carga dinâmica, radial
<b>C<sub>0r</sub></b>	3360 N	capacidade de carga estática, radial
<b>n<sub>G</sub></b>	13000 1/min	velocidade limite
<b>n<sub>B</sub></b>	0 1/min	velocidade nominal
<b>C<sub>ur</sub></b>	280 N	carga limite de fadiga, radial

**Figura 3.75 | Dimensões do rolamento de esferas selecionado. [73]**

#### 3.3.1.7.2 Anéis de Retenção

Nas soluções adotadas foram usados anéis de retenção internos e externos. Os anéis de retenção internos foram usados na caixa do suporte frontal, de forma a garantir o posicionamento do rolamento *S6306-2RSR*.

Os anéis de retenção externos foram usados nas extremidades dos veios das flanges e nos veios suporte das polias de tensão. No primeiro caso, com o objetivo de garantir o posicionamento da polia utilizada para a transmissão de potência entre o veio da flange e o veio primário da caixa de velocidades. No segundo caso para garantir o posicionamento do rolamento *S6301-2RSR*.

### 3.4 Elaboração dos projetos em 2D, desenhos de execução

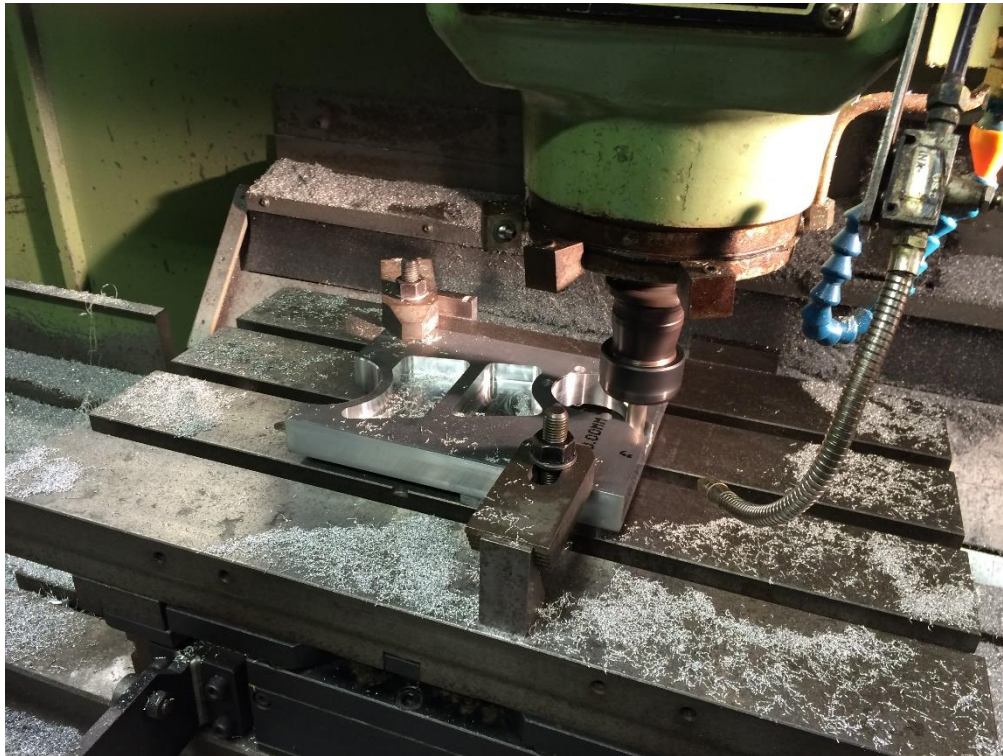
Apresentadas as soluções a adotar, com recurso ao *software* de modelação em 3D *Solidworks*, o projeto avançou para os desenhos de fabricação em 2D. Esses desenhos serão utilizados para a posterior fabricação dos mais diversos componentes projetados. Os desenhos de fabricação podem ser analisados no Anexo B. É importante referir que, os desenhos foram projetados tendo em atenção o seu processo de fabrico, de forma a facilitar as operações de maquinagem e torneamento das peças.

### 3.5 Orçamentação e encomenda do material

Com o objetivo de manter os custos associados ao projeto reduzidos, foram feitos vários pedidos de orçamentos para os diversos materiais e componentes. Assim, e após análise desses mesmos orçamentos foi decidido trabalhar com a empresa *F.Ramada* (aços), *PolyLanema* (alumínios) e *HarkerSolutions* (polias e correias).

### 3.6 Produção das peças nas oficinas

Após a conclusão dos desenhos de fabricação de todos os componentes projetados para solução a implementar, e com a aquisição do material que seria utilizado para a fabricação desses componentes, o projeto avançou para a fase de fabrico na OFSTM (Oficina de Serralharia e Tecnologia Mecânica) nas instalações da FEUP. Ver da Figura 3.76 à Figura 3.78.



*Figura 3.76 | Produção do suporte traseiro em curso*



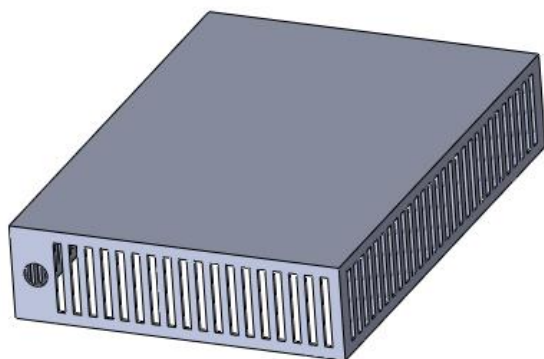
*Figura 3.77 | Flange para motor/gerador*



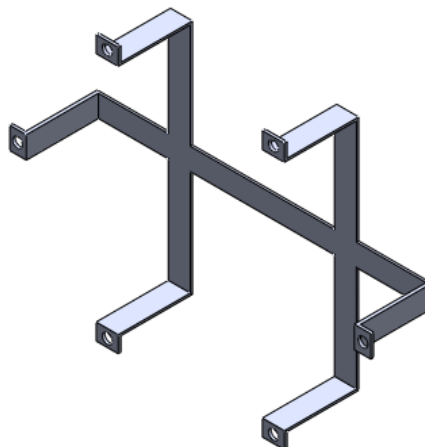
*Figura 3.78 | Fase inicial da produção do suporte frontal para motor/gerador*

### 3.7 Outros componentes projetados

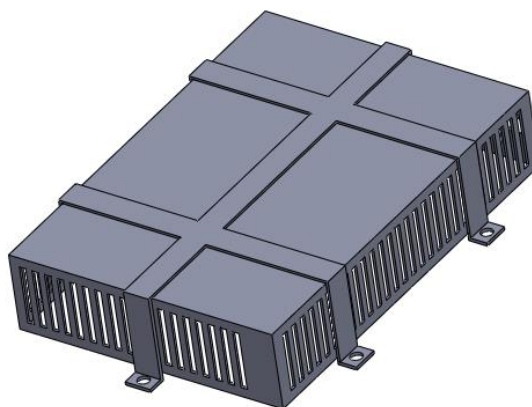
Foram ainda projetados outros componentes para serem utilizados neste projeto. Entre esses componentes está o armazenamento dos controladores e a fixação deste armazenamento ao veículo adquirido, ver Figura 3.79, Figura 3.80 e Figura 3.81. A fixação do suporte da caixa à carroçaria do veículo será assegurada por seis parafusos M10.



*Figura 3.79 | Caixa para controladores.*



*Figura 3.80 | Suporte com sistema de fixação.*



*Figura 3.81 | Montagem da caixa com respectivo suporte.*

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

Existe hoje em dia uma grande aposta dos fabricantes de veículos automóveis nos veículos híbridos (HEVs). Marcas mundialmente reconhecidas, como *Toyota*, *Opel*, *Nissan*, *Mercedes*, *Renault*, *Volvo*, entre outras, investiram e continuam a investir no desenvolvimento da tecnologia híbrida, com o objetivo de tornarem estes veículos mais atrativos para o mercado. As grandes bandeiras dos veículos híbridos são, sem sombra de dúvida, a eficiência energética e a redução substancial das emissões de gases poluentes.

Inicialmente as marcas apostaram nos mercados norte-americano, japonês e europeu, mas devido ao sucesso na penetração do mercado, em especial nos dois primeiros mencionados, viu países em transição e em desenvolvimento como a China e o Brasil, abrirem as portas a esta tecnologia. É correto afirmar, por isso mesmo, que a tecnologia híbrida já atingiu uma maturidade suficiente para que seja possível a sua implementação em larga escala, por todo o mundo.

Apesar das vantagens atrás referenciadas, a verdade é que existem também algumas barreiras que impedem um sucesso mais imediato. Os custos associados, em especial, ao seu sistema de armazenamento de energia (baterias, supercondensadores ou híbridos), a capacidade de produção ainda limitada, e falta de infraestruturas para carregamento dos veículos (usadas por veículos puramente elétricos e híbridos elétricos *plug-in*) são algumas dessas barreiras. Um fator que também deve ser tido em atenção é o impacto ambiental da produção, transporte e abate deste tipo de veículos, bem como a reciclagem de diversos componentes por eles utilizados. Apenas tendo em atenção todos estes pormenores, faz sentido investir na procura de uma tecnologia mais amiga do ambiente.

Desta forma, num futuro próximo os veículos puramente elétricos (EVs) e os híbridos elétricos *plug-in* (PHEVs) apresentam-se como as melhores alternativas para uma maior eficiência energética e redução substancial das emissões de gases poluentes, por forma a os países conseguirem cumprir os tratados assinados. Na Europa, continente em que Portugal está inserido, as vendas dos veículos híbridos no ano de 2013 atingiram valores recorde (51.109 unidades vendidas), e confirma a clara ascensão no mercado automóvel. Contudo os valores atingidos encontram-se abaixo do previsto em 2010, quando os carros híbridos começaram a ganhar o mercado.

No âmbito da realização do trabalho desta dissertação - Conversão de um veículo convencional compacto num veículo híbrido elétrico *plug-in* - foi adquirido um veículo, *Smart ForTwo*. Este veículo foi sujeito a uma análise mecânica, que proporcionou a elaboração de uma folha de cálculo tendo em vista a transformação do sistema de propulsão do veículo convencional para um sistema híbrido elétrico série *plug-in*, designado recentemente como híbrido elétrico com extensor de autonomia. Este estudo, permitiu a seleção de dois motores elétricos, um com a função de motor de



tração e o outro com a função de gerador elétrico. Tendo presente o espaço disponível no veículo adquirido, foram projetados equipamentos de suporte ao motor/gerador elétrico, bem como sistemas de transmissão de potência flexíveis e capazes de responder aos requisitos de binário e potência. Como este projeto foi realizado em parceria com o DEEC, foram também projetados todos componentes por forma a permitir o controlo eletrónico destes motores.

Após o projeto dos suportes e demais componentes, utilizando o *software Solidworks*, passamos à fase de elaboração dos desenhos de execução em 2D, para a produção das peças.

Apesar das dificuldades relacionadas com o espaço disponível e a redução do custo do projeto, conclui-se que é perfeitamente possível a transformação de um veículo compacto convencional em um veículo compacto híbrido, mantendo a maioria dos componentes originais do veículo.



## 4.2 Trabalhos Futuros

Seguindo as soluções adotadas para a hibridização do veículo adquirido, existem algumas sugestões para trabalhos futuros que podem ser explorados:

- Implementação da tecnologia híbrida no veículo, que inclui montagem dos componentes, motor/gerador elétrico e ainda sistema de transmissão de potência;
- Controlo da posição da cambota do motor de combustão interna, após o desacoplamento do volante de inércia, como anteriormente explicado;
- Possibilidade de alimentar com energia elétrica proveniente do gerador elétrico ou do sistema de armazenamento de energia, os sistemas secundários que necessitam de energia elétrica (luzes, aquecimento, autorrádio, etc.);
- Substituição do motor de combustão interna original (dado estar sobredimensionado) por um motor de menores dimensões, permitindo desta forma ganhar espaço e aumentar a eficiência do sistema;
- Eliminação da caixa de velocidades original e um projeto de transmissão novo. Permitiria também um aumento do espaço disponível com a diminuição do tamanho da transmissão e possibilitaria ainda uma transmissão sem o recurso a polias e correia;
- Estudo comparativo de consumos, eficiência, potência e emissão de gases poluentes entre o veículo convencional, o veículo elétrico (também ele presente no mercado) e ainda o híbrido elétrico com extensor de autonomia.



## 5 REFERÊNCIAS

1. Chan, C.C., *The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2007. **95**(4): p. 704-718.
2. *History Pics*. 2010.
3. Ehsani, M., *Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, And Design*. 2005: Taylor & Francis Group.
4. *La voiture électrique, 100 ans déjà !*, in *Histoire d'entreprises*.
5. Dinis, R. *Quatro Rodas um Volante*. 2007 [cited 2014 02-01-2014]; Available from: <http://www.4rodas1volante.com>.
6. Womack, J.P. and D.T. Jones, *A máquina que mudou o mundo*. 2004: Campus.
7. Amjad, S., S. Neelakrishnan, and R. Rudramoorthy, *Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(3): p. 1104-1110.
8. Emadi, A., et al., *Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2005. **54**(3): p. 763-770.
9. Yimin, G., M. Ehsani, and J.M. Miller. *Hybrid Electric Vehicle: Overview and State of the Art*. in *Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium on*. 2005.
10. *A Brief History of Hybrid Cars*. 2013 [cited 2014 04-01-2014]; Available from: <http://www.carsdirect.com>.
11. Janisse, S. and D. Engelman. *Proof. Ferdinand Porsche Created the First Functional Hybrid Car*. 2011 [cited 2013 2012-29-03]; Available from: <http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>.
12. MARTINS, J. and F. BRITO, *CARROS ELETRICOS*. 2011: PUBLINDUSTRIA.
13. Historian, O.o.t., *Oil Embargo*, U.D.o. State, Editor. 2013: Web Page.
14. Pistoia, G., *Electric and Hybrid Vehicles*. Chemical, Petrochemical & Process. 2010: Elsevier. 1-644.
15. Chevrolet Portugal, L., *Chevrolet Volt – veículo eléctrico de autonomia alargada*. 2013. **2013**.
16. Jeff Cobb, L.E.H.a.P.C. *Hybridcars*. 2013; Available from: [www.HybridCars.com](http://www.HybridCars.com).
17. Rob de Jong, M.Å., Rogier Jacobs, Elisa Dumitrescu, *UNEP - Hybrid Electric Vehicles.pdf*. 2009.
18. Concarì, C., G. Franceschini, and A. Toscani. *Hybrid-electric vehicles for advanced urban mobility: a new proposal*. in *2008 International Conference on Electrical Machines (ICEM'08), 6-9 Sept. 2008*. 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
19. Pollet, B.G., I. Staffell, and J.L. Shang, *Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects*. Electrochimica Acta, 2012. **84**: p. 235-249.
20. Plotkin, S., et al., *Hybrid electric vehicle technology assessment: methodology, analytical issues, and interim results*. 2002, Argonne National Lab., IL (US).
21. Joshi, R.P. and A.P. Deshmukh. *Hybrid electric vehicles: the next generation automobile revolution*. in *2006 IEEE Conference on Electric & Hybrid Vehicles, 18-20 Dec. 2006*. 2007. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
22. Ceroovsky, Z. and P. Mindl. *Hybrid electric cars, combustion engine driven cars and their impact on environment*. in *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 11-13 June 2008*. 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
23. Çağatay Bayindir, K., M.A. Gözükcük, and A. Teke, *A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units*. Energy Conversion and Management, 2011. **52**(2): p. 1305-1313.

24. Chan, C.C., A. Bouscayrol, and K. Chen, *Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: architectures and modeling*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010. **59**(2): p. 589-98.
25. Rohloff. *Planetary gears*. 2014 [cited 2014 03-01-2014]; Available from: [www.rohloff.de/](http://www.rohloff.de/).
26. Toth-Nagy, C., *Investigation and simulation of the Planetary Combination Hybrid Electric Vehicle*. 2000, West Virginia University: United States -- West Virginia. p. 112-112 p.
27. Taylor, S.P., *Design and Simulation of High Performance Hybrid Electric Vehicle Powertrains*. 2001, West Virginia University.
28. Xin, L. and S.S. Williamson. *Comparative Investigation of Series and Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) Efficiencies Based on Comprehensive Parametric Analysis*. in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*. 2007.
29. Lukic, S.M., et al., *Energy Storage Systems for Automotive Applications*. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008. **55**(6): p. 2258-2267.
30. Max, J., *Micro Híbrido*. 2009.
31. Luís, T., *Honda Insight* 2012.
32. Toyota. *Toyota Prius 2012*. 2012 [cited 2014 02-02-2014]; Available from: [www.toyota.es](http://www.toyota.es).
33. Wu, X., et al., *Component sizing optimization of plug-in hybrid electric vehicles*. Applied Energy, 2011. **88**(3): p. 799-804.
34. Myers, R. *Evaluating Plug-In Series Hybrid Designs*. 2007.
35. Energy, U.S.D.o. *Plug-in Hybrids*. Energy Efficiency & Renewable Energy 2013 [cited 2013].
36. DeMers, S.M., *Mechanical and regenerative braking integration for a hybrid electric vehicle*. 2008, University of Waterloo (Canada): Canada. p. 165.
37. Bosch. *Bosch Automotive Technology*. 2014 [cited 2014 02-02-2014]; Available from: [www.bosch-automotivetechology.com](http://www.bosch-automotivetechology.com).
38. Lee, J. and D.J. Nelson. *Rotating inertia impact on propulsion and regenerative braking for electric motor driven vehicles*. in *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*. 2005. IEEE.
39. Audi. *Audi Star and Stops*. 2011 [cited 2014 02-02-2014]; Available from: <http://insight.audi.co.za/articles/31>.
40. Brahmachari, R. *Hybrid Cars*. 2010 [cited 2014 02-01-2014].
41. Martins, J., *Motores de Combustão Interna (3ª Edição)*. 3ª ed. 2011.
42. Silva, D.C.M.d. *Produção do movimento nas máquinas térmicas*. 2012 [cited 2014 02-02-2014]; Available from: <http://www.alunosonline.com.br/fisica/producao-movimento-nas-maquinas-termicas.html>.
43. motas, B.d.c.e., *Motores a Gasolina*. 2013.
44. Tecnodiesel, *Princípios de Turboalimentação*. 2012.
45. *The Car Specifications Site*. 2013 28-02-2013 [cited 2013 29-05-2013]; Available from: <http://www.carfolio.com/>.
46. Zeraoulia, M., M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo, *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2006. **55**(6): p. 1756-1764.
47. World, E., *Citroen Introduces 2013 Berlingo Electric Work Van*. 2013.
48. Renault, *Motor híbrido para Renault Kangoo*. 2007.
49. Renault, *Kangoo Express Z.E.* 2010.
50. King, D., *BMW X5 Hybrid*. 2013.
51. Ostrop/AP, F. *Toyota promises cleaner, cheaper 'plug-in' Prius hybrid*. 2009.
52. Carter, M. *Honda Releases More Details About the New Insight Hybrid*. 2008.
53. News, G.I. *Chevy, take a page from Holden*. 2011 [cited 2014 02-02-2014]; Available from: [www.gminsidenews.com](http://www.gminsidenews.com).
54. Khaligh, A. and L. Zhihao, *Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric*

- Vehicles: State of the Art*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2010. **59**(6): p. 2806-2814.
55. Services, T.T. *Batteries*. 1994 [cited 2014 7-2-2014]; Available from: [www.techtransfer.com](http://www.techtransfer.com).
  56. Tie, S.F. and C.W. Tan, *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **20**: p. 82-102.
  57. *Bateria de lítio-polímero - Museu da Electricidade*. 2013. **2013**.
  58. Toyota, *Toyota is Turning Old NiMH Batteries Into New Batteries*. 2014.
  59. Varta, *VARTA Battery Range*. 2014.
  60. Vanzieleghem, B., *Ultra-Capacitors: Making electric hybrids more efficient*. 2006.
  61. Salmasi, F.R., *Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2007. **56**(5): p. 2393-2404.
  62. Fiat, *Fiat Seicento (600)*.
  63. Toyota, *Toyota iQ cria novo tipo de Fonte*. Pércles Tabosa.
  64. StandVirtual, *Smart ForTwo*. 2013.
  65. Mad4Wheels, *Aixam 400*. 2013.
  66. Cerqueira, M. *História do Smart*. 2013 [cited 2013; Available from: <http://autoviva.sapo.pt/smart-info/marca/1537>].
  67. Consult, M. *Smart História*. 2013 [cited 2014 02-02-2014]; Available from: <http://www.motorconsult.pt/marcas/smart/historia#.UvkLoLQ3YWg>.
  68. Info, S. *Nicolas Hayek, a look back*. 2013; Available from: [www.swissinfo.ch](http://www.swissinfo.ch).
  69. Wikipedia, *Smart ForFour*. 2004.
  70. ENSTROJ, *manual\_for\_emrax\_motor\_november\_2013\_new*. 2013.
  71. Aluminium, G. *EN AW 7075*. [cited 2014 10-2-2014]; Available from: <http://gleich.de/br/produtos/chapas-de-alumnio-laminadas/chapas-de-alumnio-laminadas-en-aw/en-aw-7075#sheet>.
  72. Sit, *falcon HTC 1*. 2013.
  73. Schaeffler-FAG. *Rolamentos, mancais de deslizamento, acessórios*. [cited 2014 02-01-2014]; Available from: [http://medias.schaeffler.de/medias/pt!hp.ec/1\\_R\\*0\\*F\\*3#S63..-2RSR](http://medias.schaeffler.de/medias/pt!hp.ec/1_R*0*F*3#S63..-2RSR).



## 6 ANEXOS

### Anexo A: Suporte do motor de tração

#### A.1 Calculo dos esforços aplicados ao suporte

##### Cargas sofridas pelo suporte do motor:

Força da correia:

$$T_{motor} = r_{polia} \times F \Leftrightarrow 80[N.m] = \frac{0,0713}{2}[m] \times F \Leftrightarrow F = 2244,04[N]$$
$$\Leftrightarrow F \cong 2244[N]$$

Vetor posição:

$$\overrightarrow{R_1} = \begin{vmatrix} -0.200 \\ 0.096 \\ 0.120 \end{vmatrix} [m]$$

Binário produzido:

$$\overrightarrow{T_1} = \overrightarrow{R_1} \times \overrightarrow{F} = \begin{vmatrix} -0.200 \\ 0.096 \\ 0.120 \end{vmatrix} [m] \times \begin{vmatrix} -2254 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} [N] = \begin{vmatrix} 0 \\ -269,285 \\ 214,642 \end{vmatrix} [N.m]$$

Peso do motor:

$$\overrightarrow{F_g} = \begin{vmatrix} 0 \\ -78,480 \\ 0 \end{vmatrix} [N]$$

$$\overrightarrow{R_2} = \begin{vmatrix} -0,200 \\ 0,060 \\ 0 \end{vmatrix} [m]$$

$$\overrightarrow{T_2} = \overrightarrow{R_2} \times \overrightarrow{F_g} = \begin{vmatrix} -0,200 \\ 0,060 \\ 0 \end{vmatrix} [m] \times \begin{vmatrix} 0 \\ -78,480 \\ 0 \end{vmatrix} [N] = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 15,696 \end{vmatrix} [N.m]$$

**Total:**

$$\overrightarrow{T_t} = \overrightarrow{T_1} + \overrightarrow{T_2} = \begin{vmatrix} 0 \\ -269,285 \\ 214,642 \end{vmatrix} [N.m] + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 15,696 \end{vmatrix} [N.m] = \begin{vmatrix} 0 \\ -269,285 \\ 230,338 \end{vmatrix} [N.m]$$

## A.2 Análise de tensões e deslocamentos para o suporte frontal

Momento a simular:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ -269,285 \\ 230,338 \end{bmatrix} [N.m]$$

Ponto de aplicação:

$$P \rightarrow \begin{pmatrix} -0,200 \\ 0,060 \\ -0,085 \end{pmatrix} [m]$$

Força a aplicar:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} -2000 \\ 1750 \\ 500 \end{bmatrix} [N]$$

Com base nesta força resultante foi possível, através do *software SolidWorks 2013*, testar o suporte frontal, ver da Figura 6.1 à Figura 6.4

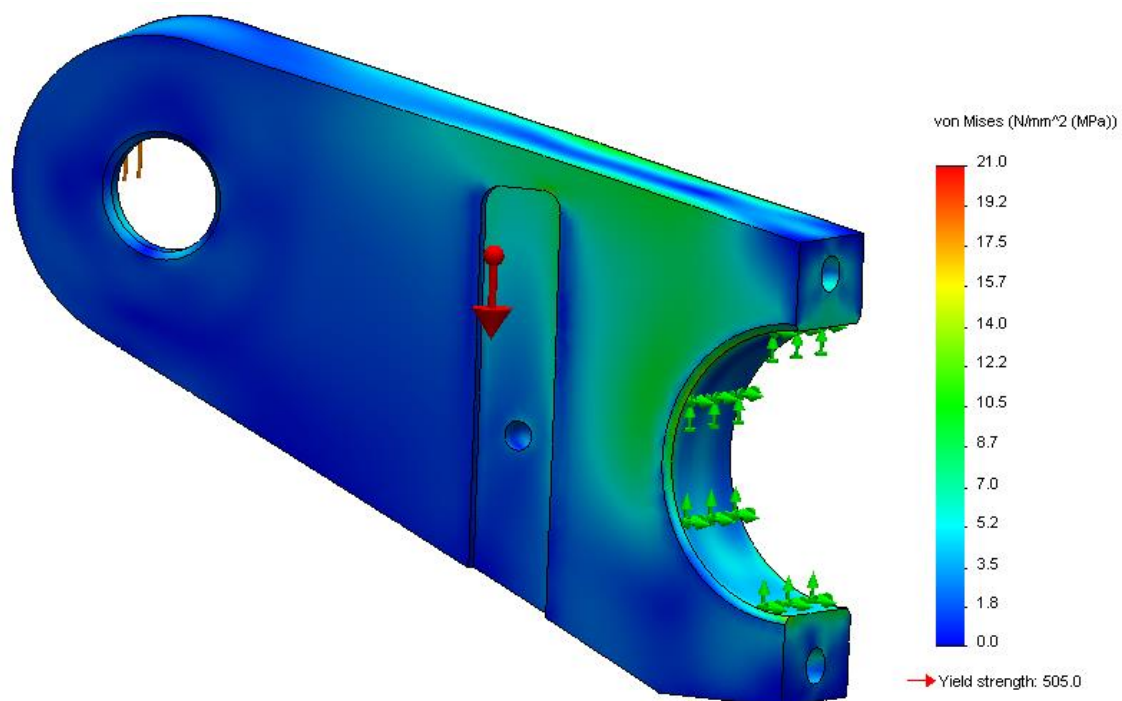


Figura 6.1 | Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa)



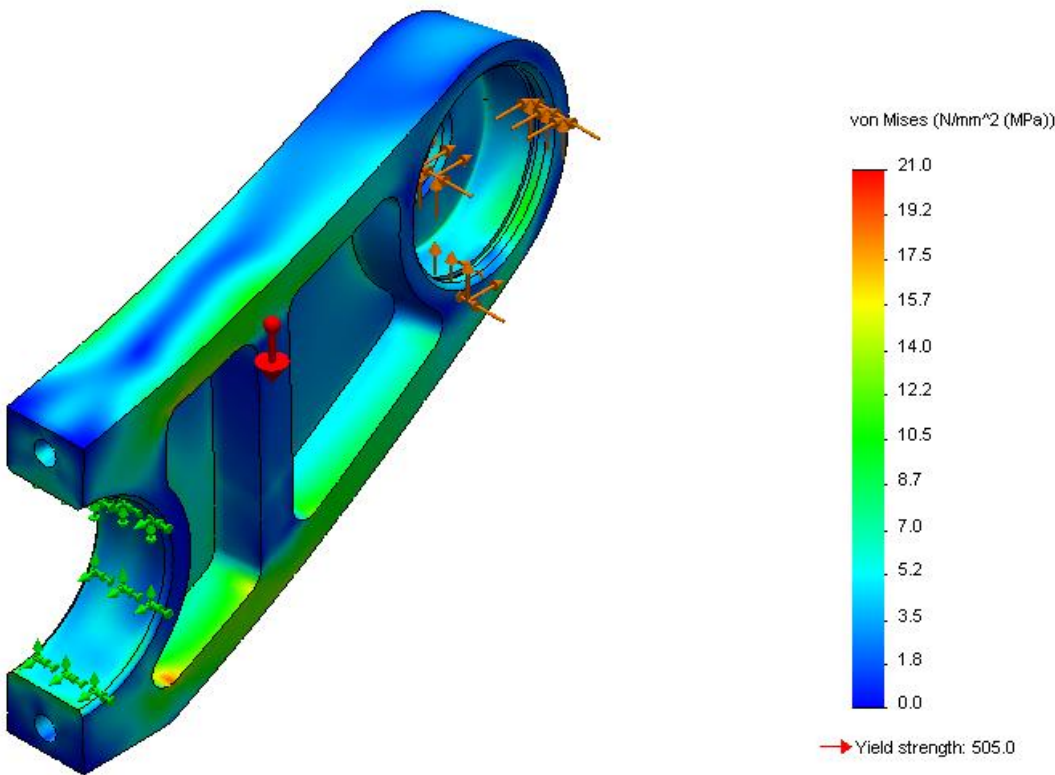


Figura 6.2 | Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa)

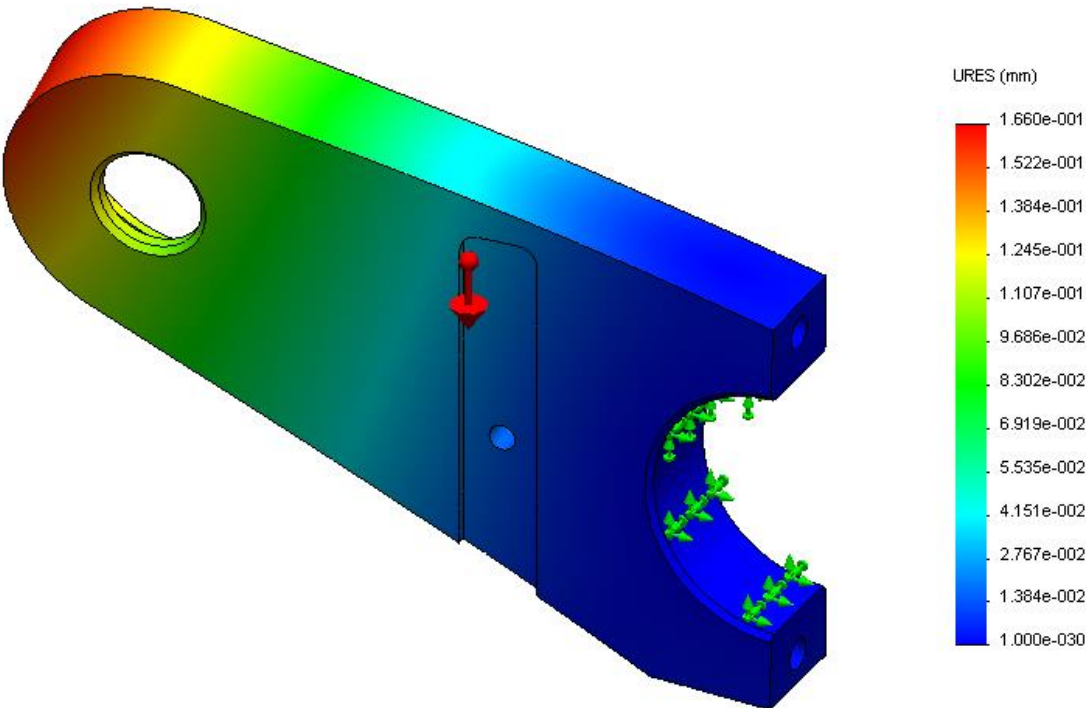


Figura 6.3 | Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm)

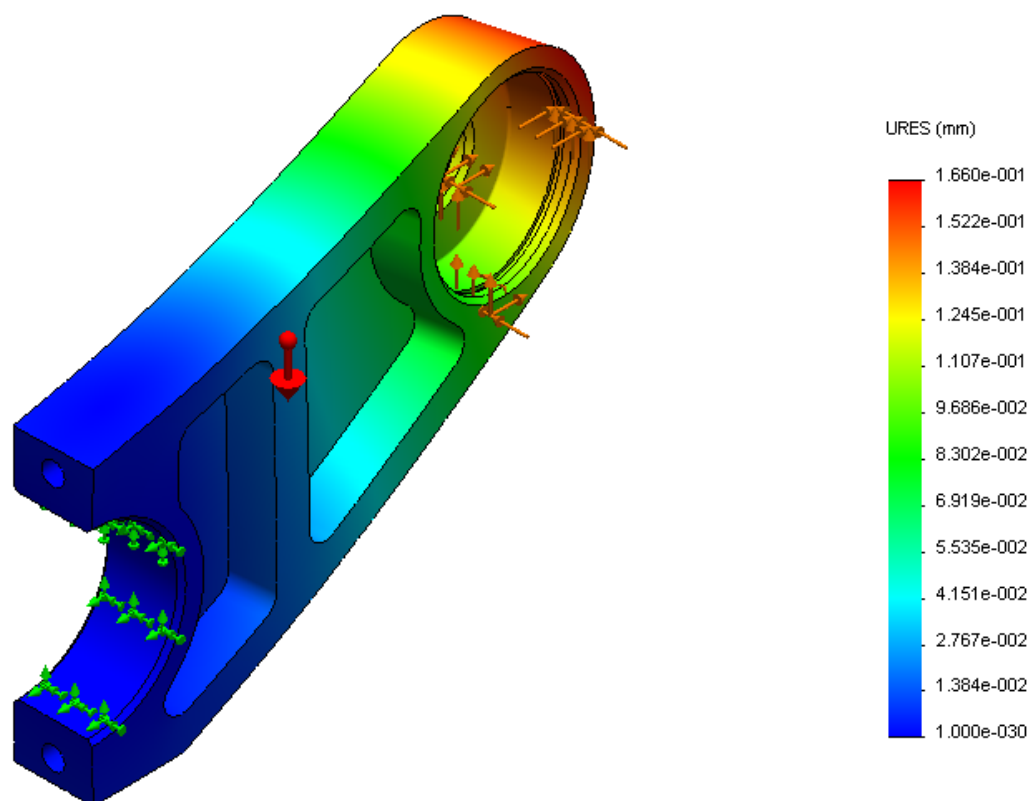


Figura 6.4 | Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm)

A Tabela 6.1 apresenta os valores máximos de tensão e deslocamento sofridos pelo suporte do motor de tração.

Tabela 6.1 | Valores máximos de tensão e deslocamento atingidos.

Tensão máxima	21,0 MPa
Deslocamento máximo	0,166 mm

### A.3 Análise de tensões e deslocamentos para o suporte traseiro

Momento a simular:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ 269,285 \\ -230,338 \end{bmatrix} [N.m]$$

Ponto de aplicação:

$$P \rightarrow \begin{pmatrix} -0,200 \\ 0,060 \\ 0,085 \end{pmatrix} [m]$$

Força a aplicar:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} -2000 \\ -550 \\ -500 \end{bmatrix} [N]$$

Com base nesta força resultante foi possível, através do *software SolidWorks 2013*, testar o suporte traseiro, ver da Figura 6.5 à Figura 6.8.

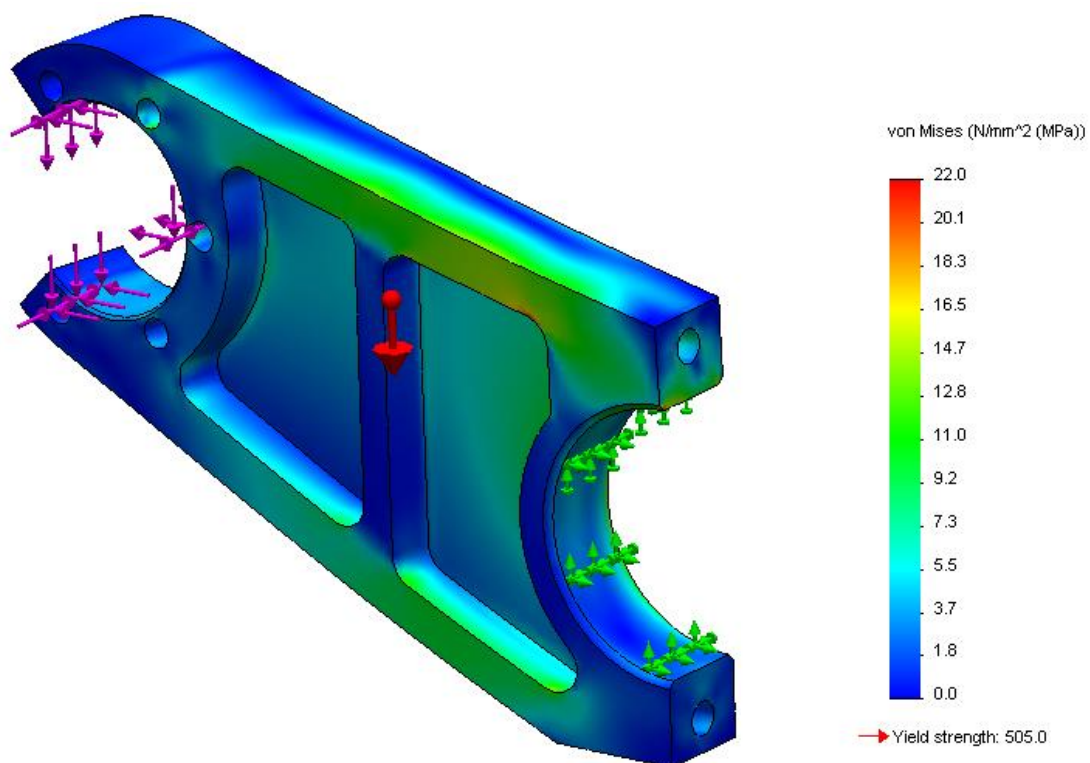


Figura 6.5 | Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa)

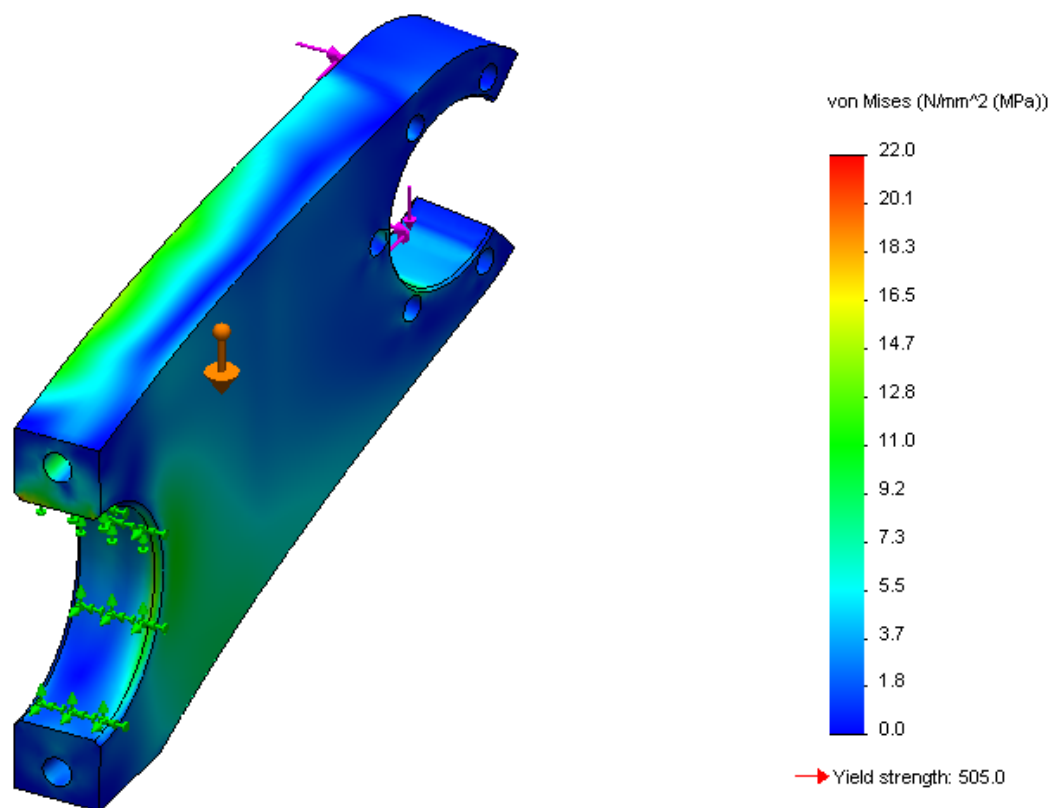


Figura 6.6 | Distribuição das tensões no suporte do motor tração (MPa)

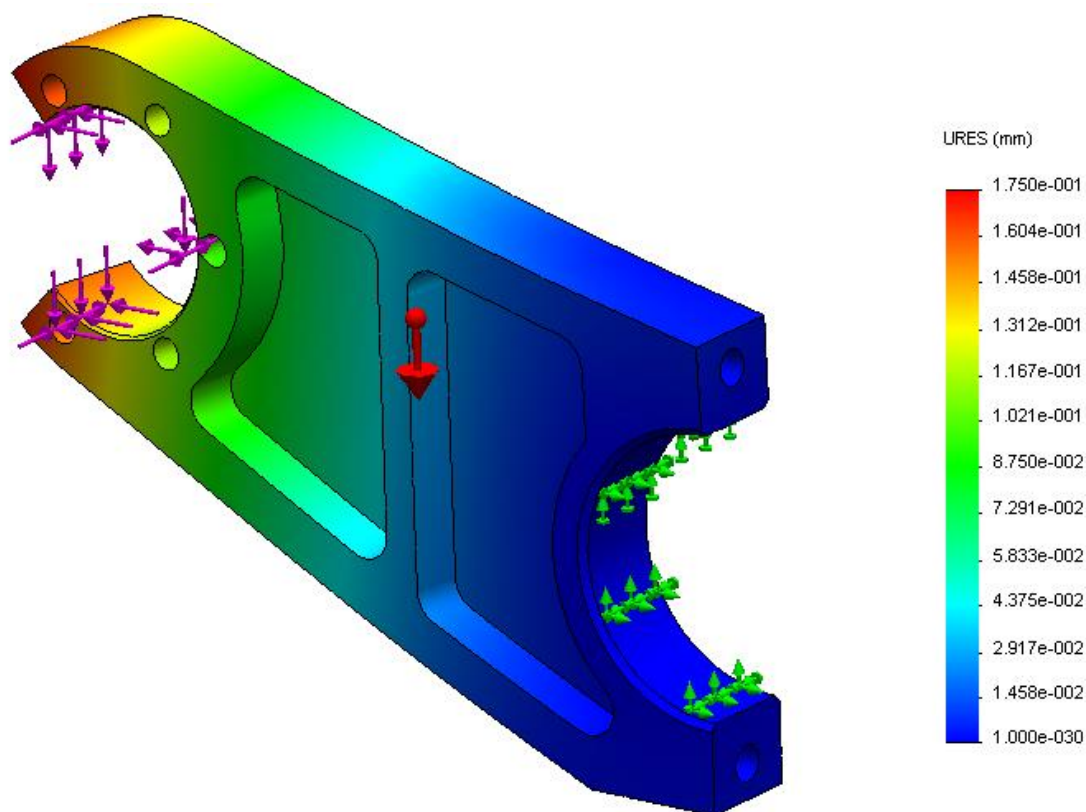


Figura 6.7 | Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm)

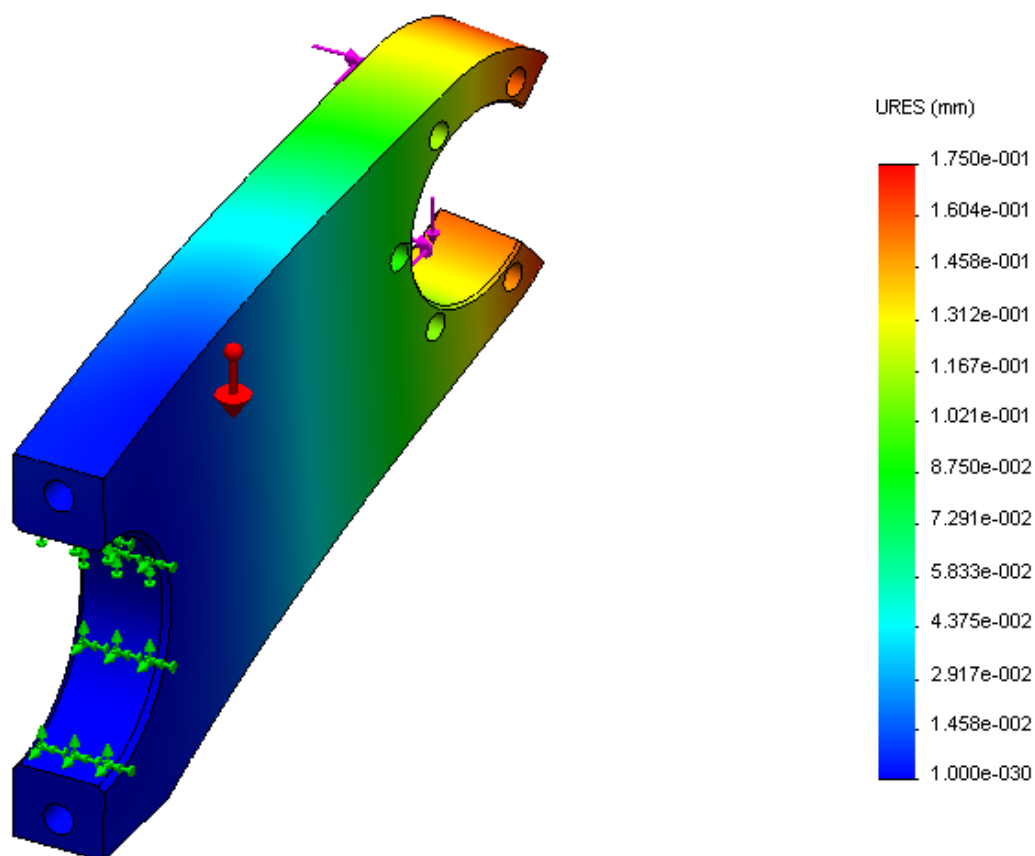


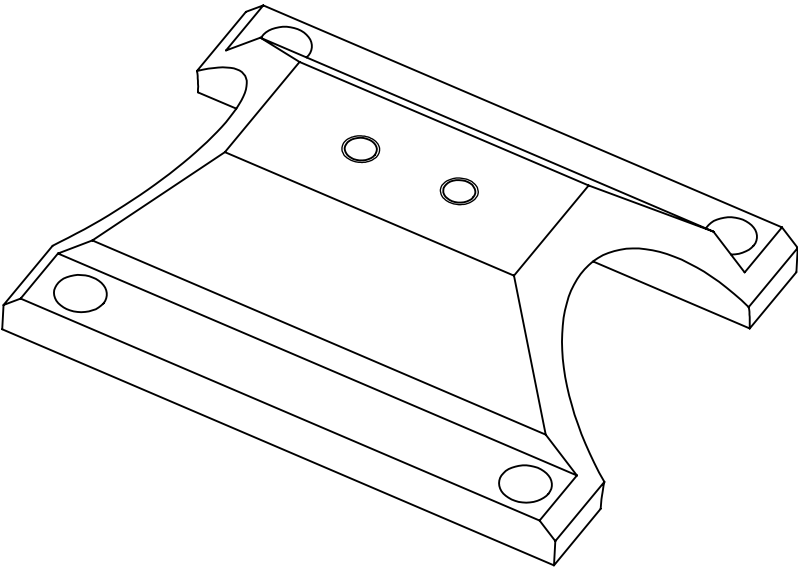
Figura 6.8 | Deslocamento máximo sofrido pelo suporte do motor (mm)

A Tabela 6.2 apresenta os valores máximos de tensão e deslocamento sofridos pelo suporte do motor de tração.

Tabela 6.2 | Valores máximos de tensão e deslocamento atingidos.

Tensão máxima	22,0 MPa
Deslocamento máximo	0,175 mm

## **Anexo B: Desenhos de Fabricação**



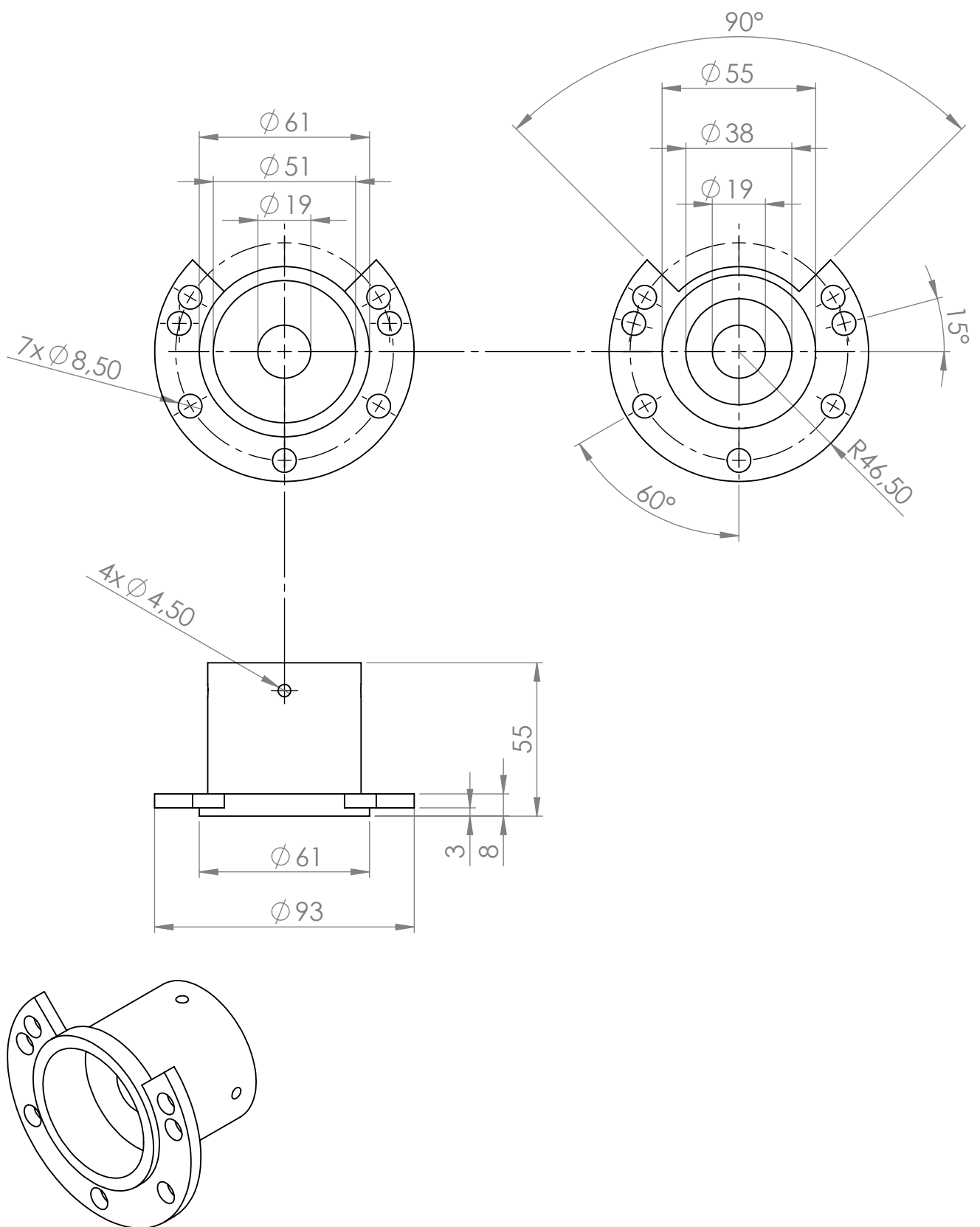
DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães
PROJ.				
CÓP.				
VER.				
ESC. 1:2	1ºDiedro	TÍTULO:  <b>Encaixe para Suportes</b>		
	A3			
Toleranciam. Geral: ISO 8015 ISO 2768				
			Data: 18/11/2013	





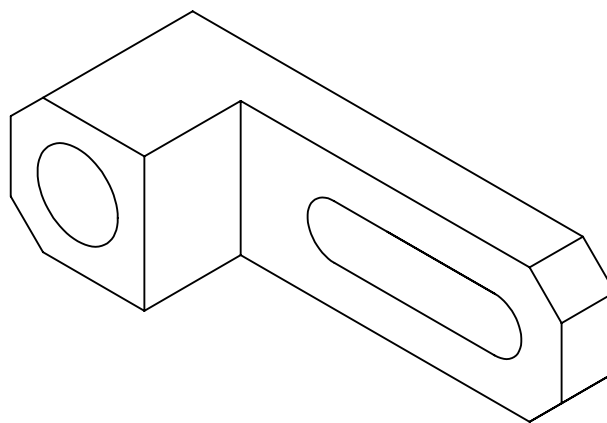
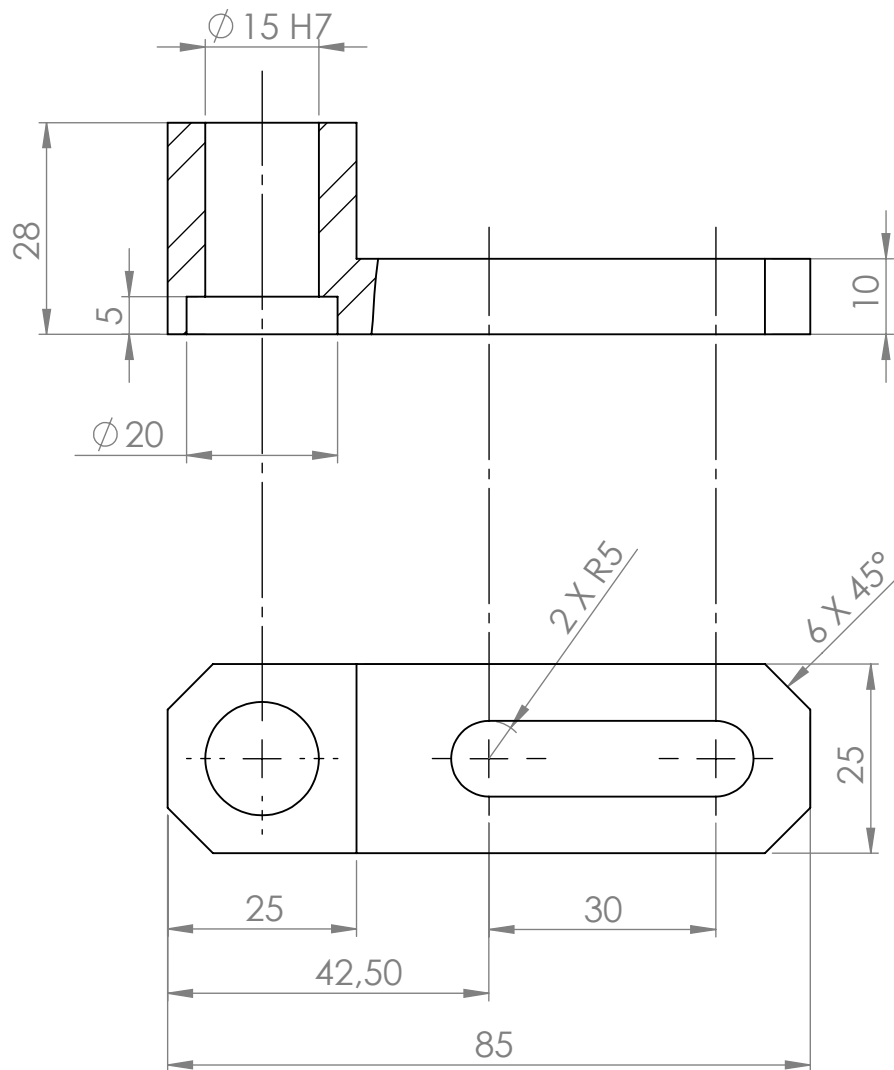






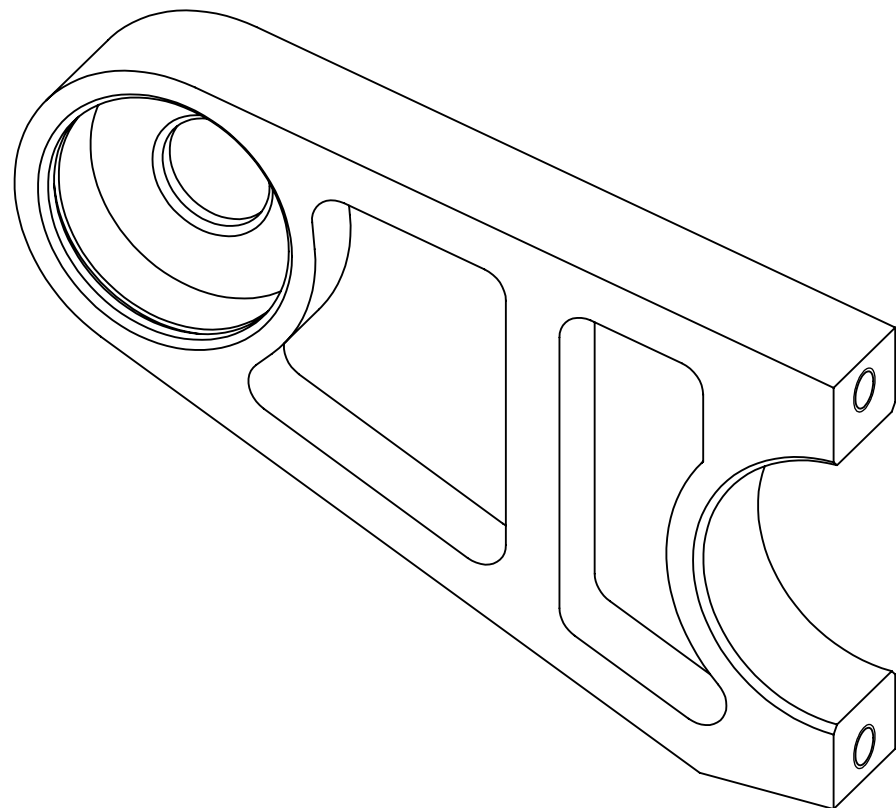
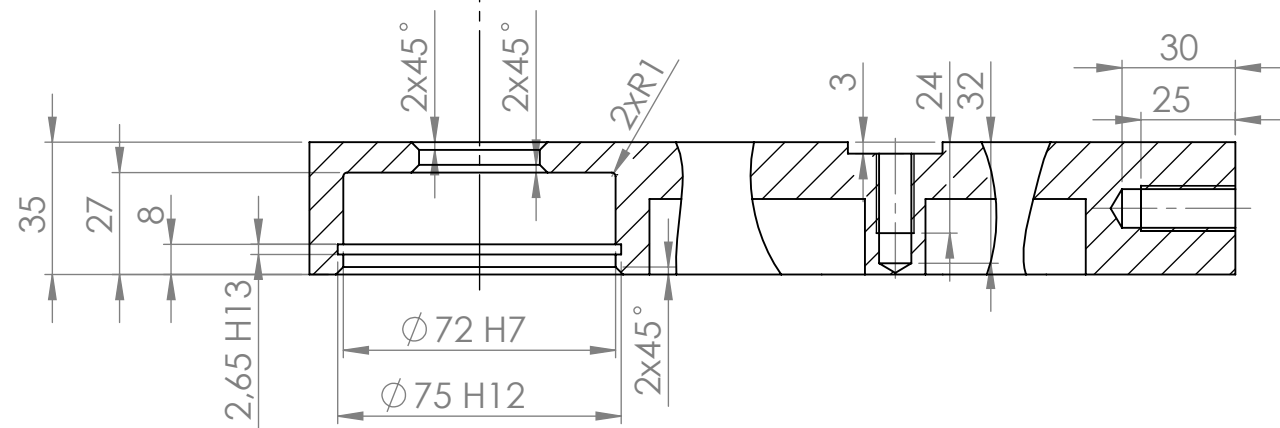
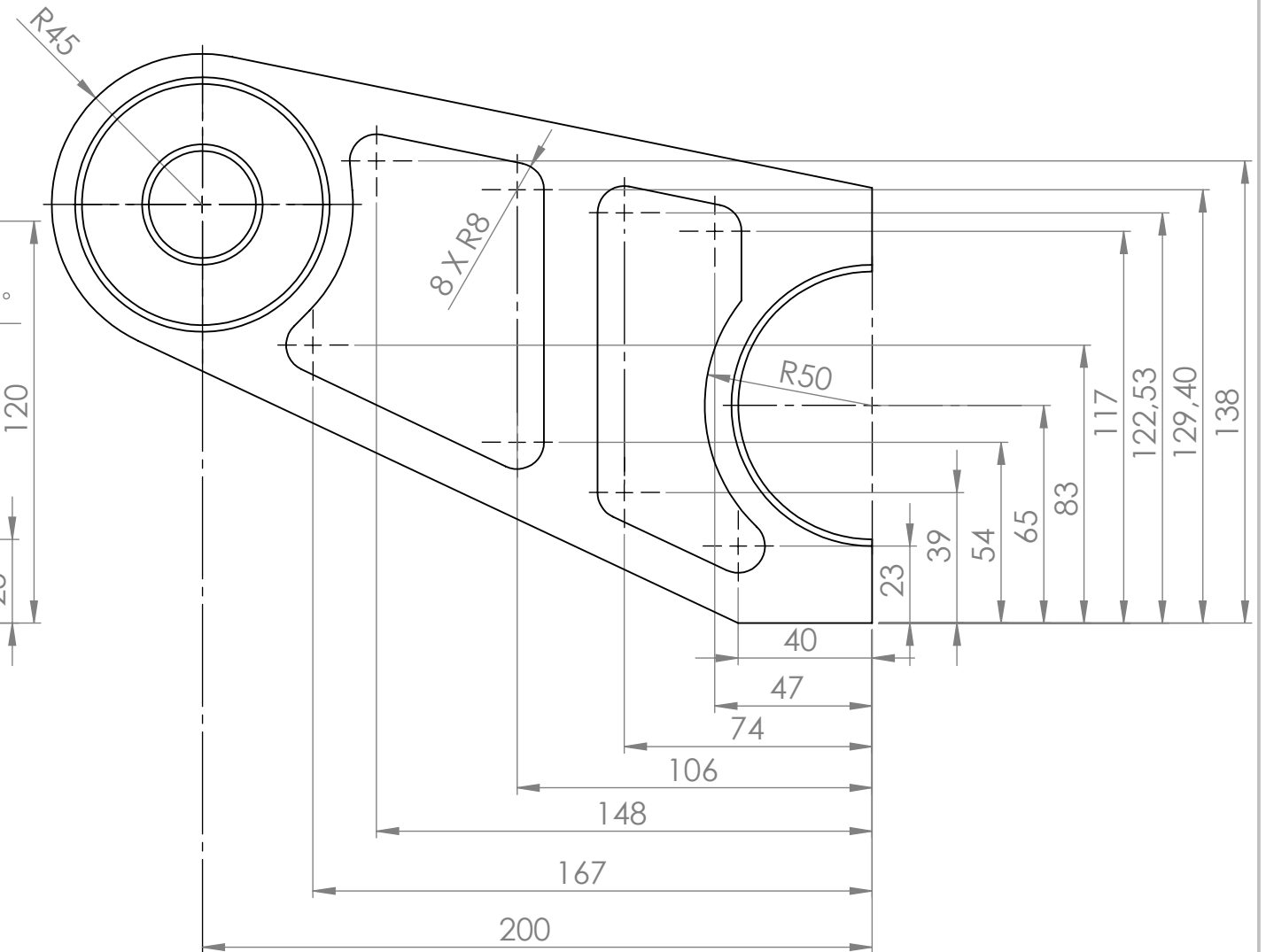
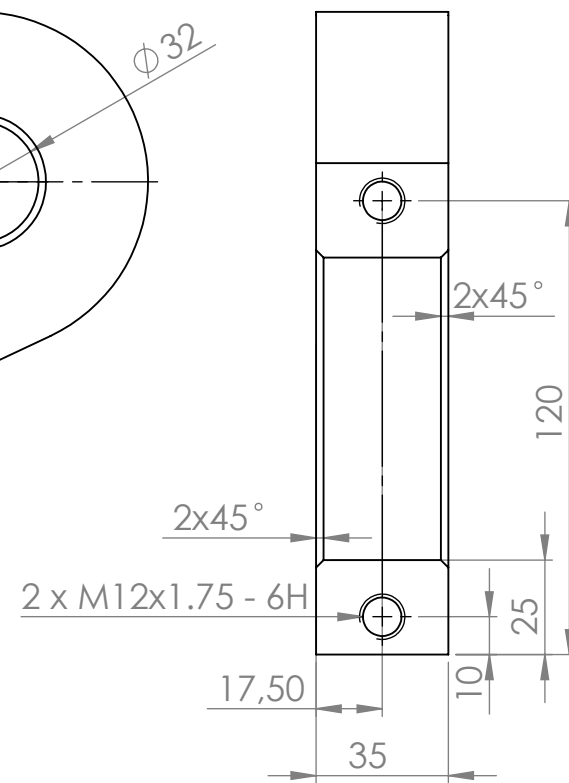
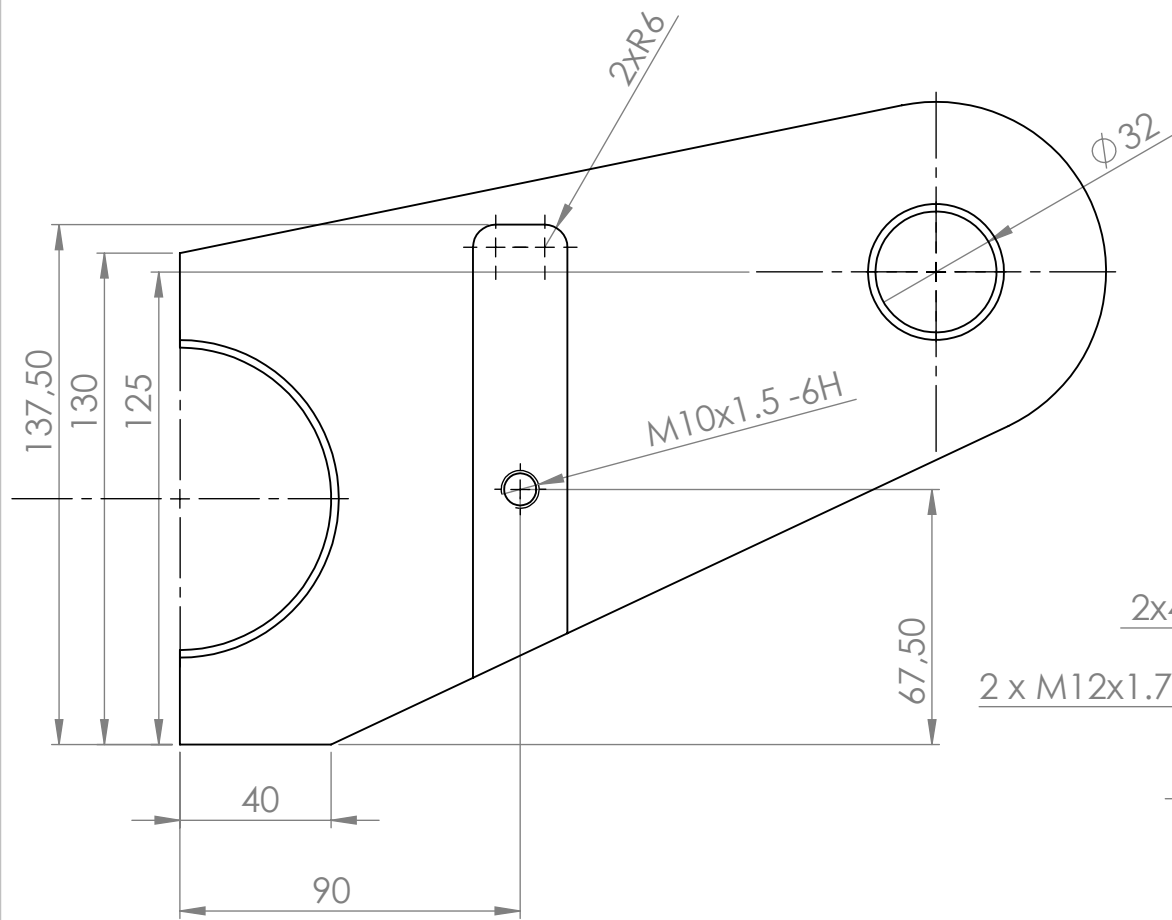
DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães	
PROJ.					
CÓP.					
VER.					
ESC.	1ºDiedro	TÍTULO:			
1:1	A4				
Toleranciam. Geral:		Suporte/Guiamento Resolver			
ISO 8015					
ISO 2768					
				Data: 18/11/2013	





DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães
PROJ.				
CÓP.				
VER.				
ESC.	1ºDiedro	TÍTULO:		
1:1	A4			
Toleranciam.		<b>Suporte Polia de Tensão</b>		
Geral:				
ISO 8015				
ISO 2768				
		Data: 18/11/2013		

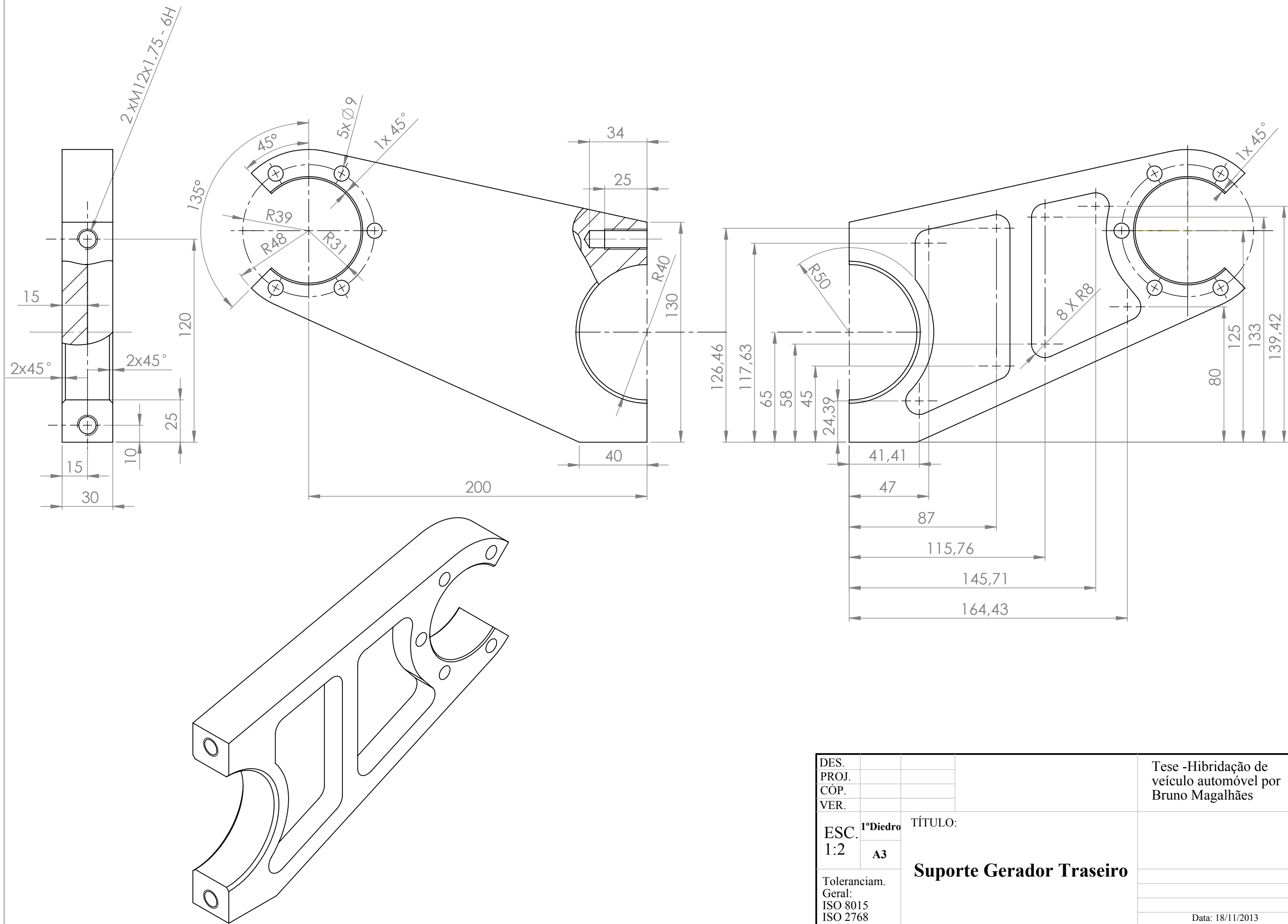




DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães
PROJ.				
CÓP.				
VER.				
ESC.	1ºDiedro	TÍTULO:  <b>Suporte Gerador Frontal</b>		
1:2	A3			
Toleranciam.				
Geral:				
ISO 8015				Data: 18/11/2013
ISO 2768				

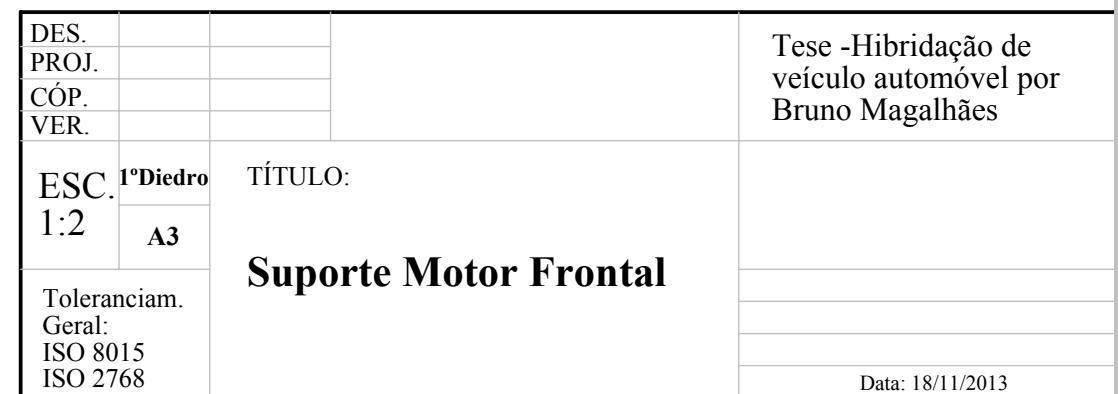
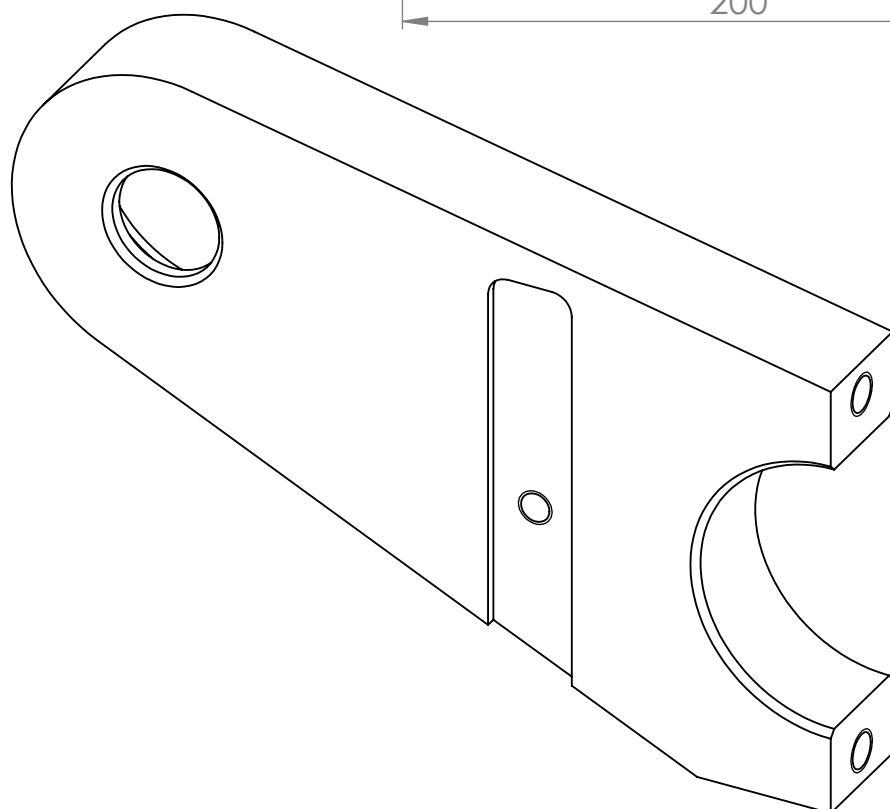




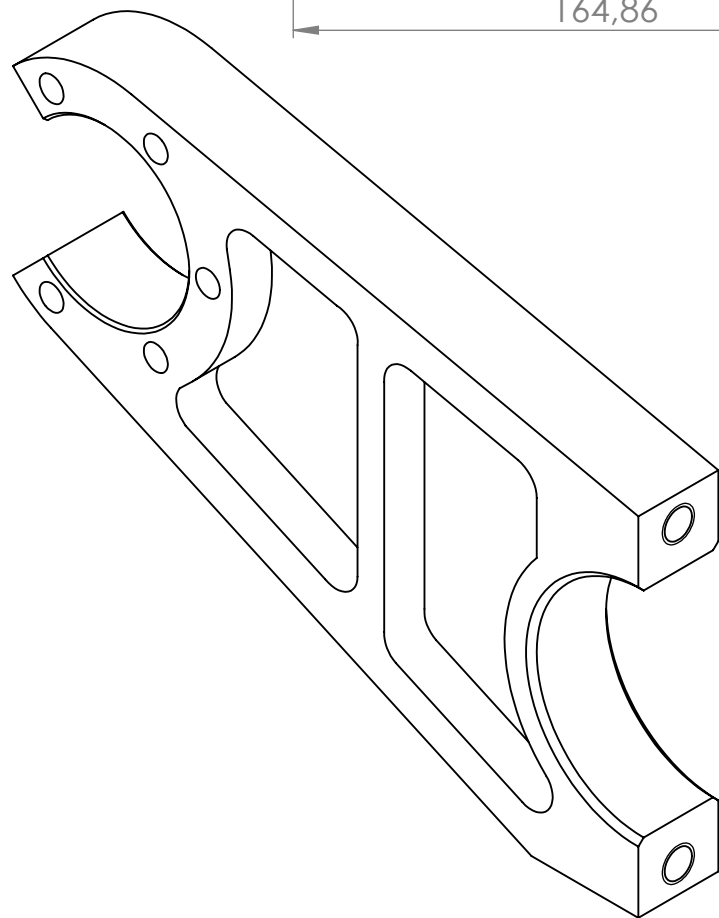
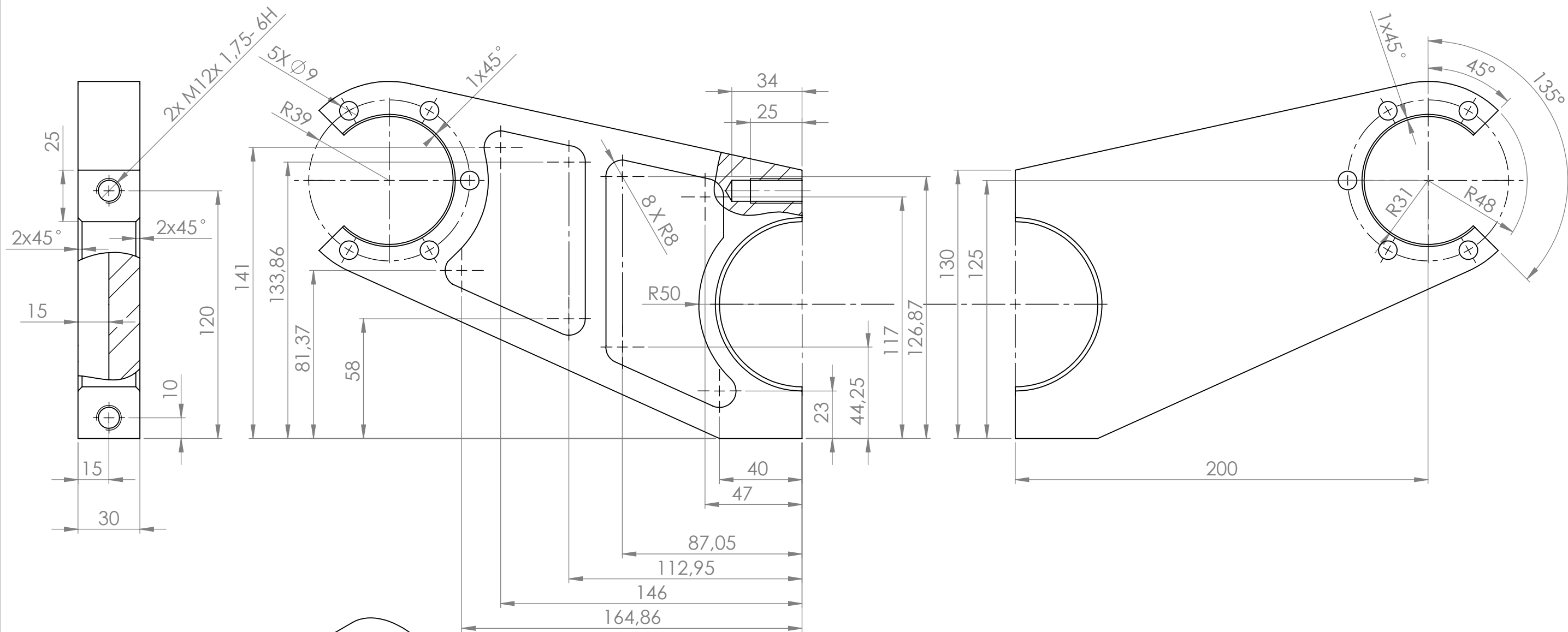


DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães
PROJ.				
CÓP.				
VER.				
ESC.	1ºDiedro	TÍTULO:		
1:2	A3			
Toleranciam. Geral:		<b>Suporte Gerador Traseiro</b>		
ISO 8015				
ISO 2768				
				Data: 18/11/2013



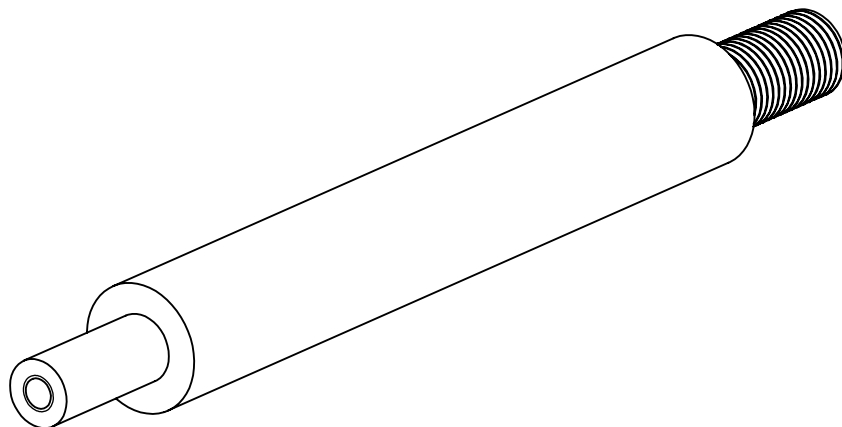
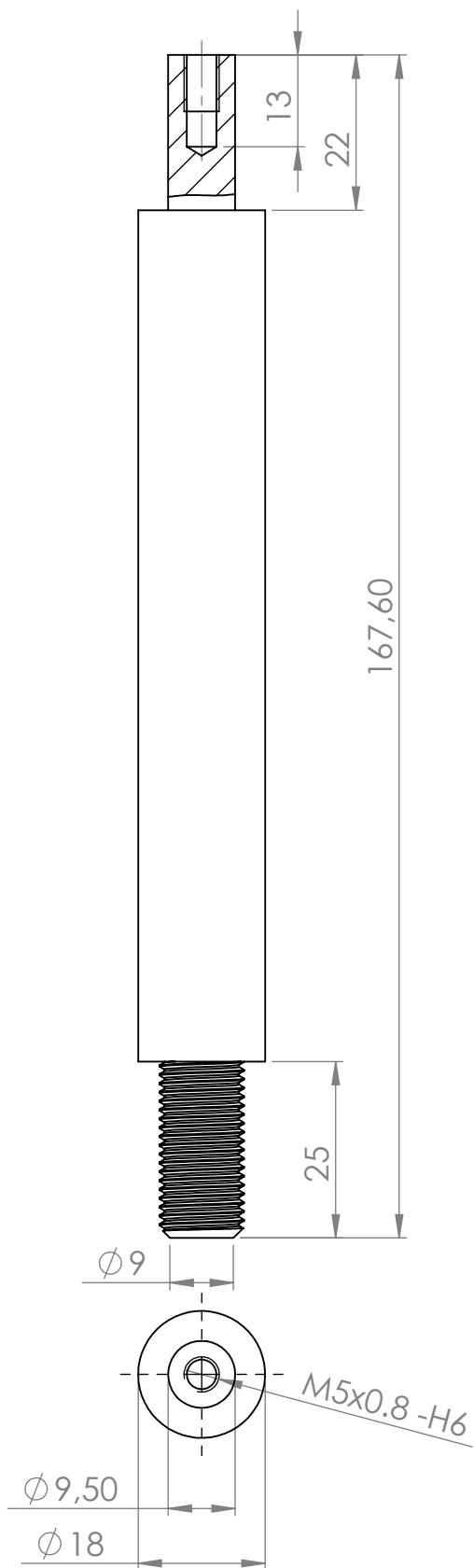






DES.			Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães
PROJ.			
CÓP.			
VER.			
ESC.	1ºDiedro	TÍTULO:  <b>Suporte Motor Traseiro</b>	
1:2	A3		
Tolerancias. Geral: ISO 8015 ISO 2768			
			Data: 18/11/2013

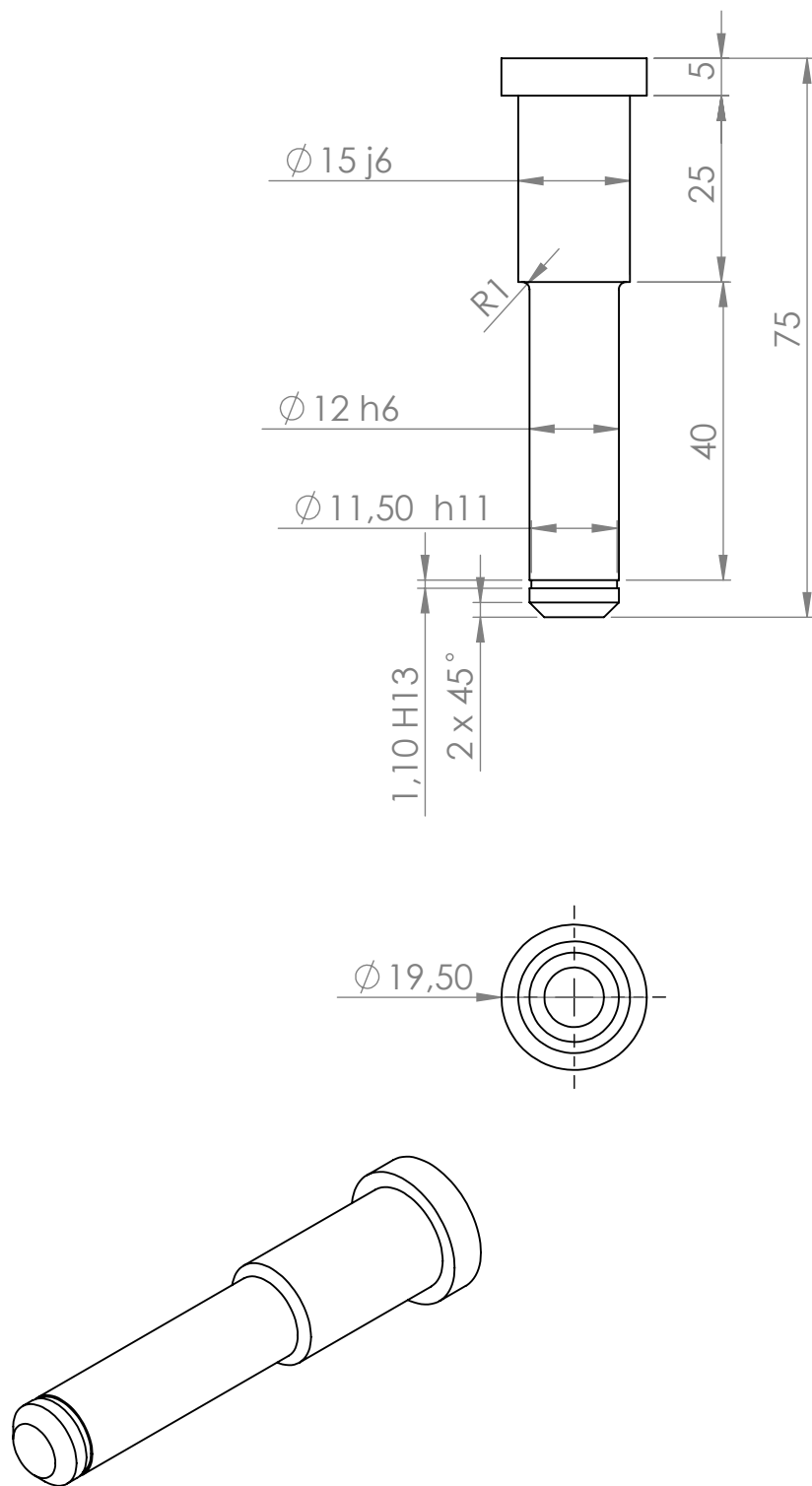




DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães
PROJ.				
CÓP.				
VER.				
ESC. 1:2	1ºDiedro	TÍTULO:  <b>Veio</b>		
	A4			
Toleranciam. Geral: ISO 8015 ISO 2768				
				Data: 18/11/2013







DES.				Tese -Hibridação de veículo automóvel por Bruno Magalhães	
PROJ.					
CÓP.					
VER.					
ESC.	1ºDiedro	TÍTULO:			
1:1	A4				
Toleranciam. Geral:		<b>Veio Suporte Polia de Tensão</b>			
ISO 8015					
ISO 2768					
				Data: 18/11/2013	

